The Proceedings of the 58th Annual Conference

การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58
วันที่ 5-7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563

KU
KASETSART UNIVERSITY

Proceedings No. 2

SCIENCE TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT

“นวัตกรรม สร้างสรรค์ไทย
เพื่อเป้าหมายในการพัฒนาอย่างยั่งยืน”
“Inno-creative Thailand for Sustainable
Development Goals (SDGs)”

สาขาวิทยาศาสตร์
Science
สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
Engineering and Architecture
สาขาอุตสาหกรรมเกษตร
Agro-Industry
สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
Natural Resources
and Environment

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 58 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of the 58th Kasetsart University Annual Conference

เล่มที่ 2

สาขาวิทยาศาสตร์

(Subject: Science)

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

(Subject: Engineering and Architecture)

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

(Subject: Agro-Industry)

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources and Environment)

จัดโดย (Organized by)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University)

ร่วมกับ (in cooperation with)

กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

(Ministry of Education, Science, Research and Innovation)

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Ministry of Agriculture and Cooperatives)

กระทรวงศึกษาธิการ (Ministry of Education)

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Ministry of Natural Resource and Environment)

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม (Ministry of Digital Economy and Society)

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

(Thailand Science Research and Innovation)

สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (National Research Council of Thailand)

5 -7 **กุมภาพันธ์** 2563 (February 5-7, 2020)

The Proceedings of the 58th Kasetsart University Annual Conference

การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58

วันที่ 5-7 **กุมภาพันธ์ พ.ศ.** 2563

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิมพ์ครั้งที่ 1 เดือนเมษายน 2563

จัดทำโดย

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลิขสิทธิ์เป็นของ

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 02-579-5548

ISBN (e-book): 978-616-278-562-7

คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ได้จัดการประชุมวิชาการอย่างต่อเนื่องเป็นประจำทุกปี โดยในปี พ.ศ. 2563 ได้จัดให้มีการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 58 ระหว่างวันที่ 5-8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563 ภายใต้หัวข้อ “นวัตกรรมสร้างสรรค์ไทย เพื่อเป้าหมายในการพัฒนาอย่างยั่งยืน” (Inno-creative Thailand for Sustainable Development Goals (SDGs)) เพื่อส่งเสริมให้คณาจารย์ นักวิจัยและนักวิชาการสาขาต่างๆ นำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความคิดเห็น ประสบการณ์ และความชำนาญ ทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ซึ่งจะนำไปสู่ความร่วมมือทางการวิจัยและยังเปิดโอกาสให้นิสิต นักศึกษา ได้แสดงผลงานทางวิชาการ เพื่อถ่ายทอดและเผยแพร่สู่สาธารณชน อันจะนำมาซึ่งความกินดี อยู่ดี และการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน

การนำเสนอผลงานวิชาการประกอบด้วยภาคบรรยายจำนวน 177 เรื่อง และภาคโปสเตอร์จำนวน 105 เรื่อง รวม 282 เรื่อง ใน 12 สาขา ได้แก่ สาขาพืช สาขาสัตว์ สาขาสัตวแพทยศาสตร์ สาขาประมง สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สาขาศึกษาศาสตร์ สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ โดยจัดพิมพ์ e-proceedings รวมจำนวน 253 เรื่อง

เอกสารฉบับนี้เป็นการรวบรวมเรื่องเต็มผลงานวิจัย ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทั้งภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ เล่มที่ 2 ประกอบด้วย **สาขาวิทยาศาสตร์** จำนวน 17 เรื่อง **สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์** จำนวน 47 เรื่อง **สาขาอุตสาหกรรมเกษตร** จำนวน 31 เรื่อง **และสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม** จำนวน 13 เรื่อง ซึ่งได้ผ่านการคัดเลือกจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขา และนำเสนอในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 58

ในนามของคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 58 ขอขอบคุณคณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และนิสิตนักศึกษา ที่ได้นำผลงานมาเสนอ และผู้ที่สนใจเข้าร่วมการประชุมทางวิชาการในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกฝ่ายที่สละเวลา แรงกาย แรงใจและความคิด ร่วมมือกันจัดเตรียมการประชุม จนทำให้การประชุมทางวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศรปราชญ์ ธไนศวรรยางกูร)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิจัย
ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 58

ความสมบูรณ์ของการเสนอผลงาน
ในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 58
ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประกอบด้วย หนังสือรับรองการมาเสนอผลงาน
และการได้ตีพิมพ์ลงในเอกสารบทคัดย่อ

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: kuannualconf@gmail.com

Website: http://annualconference.ku.ac.th, http://www.rdi.ku.ac.th

สารบัญ

สาขาวิทยาศาสตร์ (Subject: Science)

			หน้า
ภาคบรรยาย (Oral Presentation)			
1.	วท. 6O33	การประยุกต์เทคนิคการตรวจจับขอบภาพสำหรับการวัดเส้นสเกล The Implementation of Edge Detection Technique for Line-Scale Measurement โดย พนัญญา สมวงษ์, นพฤทธิ์ จินันทุยา และ วิโรจน์ สุดาธรรม	2
2.	วท. 13/O108	การออกแบบแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่นโดยใช้ LED ร่วมกับเกรตติงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน Design of Multispectral Light Source using LED and Reflected Diffraction Grating โดย จันทร์ฑรัตน์ มากชุม และ นพฤทธิ์ จินันทุยา	10
3.	วท.23/O196	Expression of the Biological Clock Gene, *timeless* in Malaria Vector, *Anopheles dirus* (Diptera: Culicidae) under the Effect of Global Warming By Thananya Comproh, Uraiwan Arunyawat, Sungsit Sungvornyothin and Waraporn Juntarajumnong	18
ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)			
1.	วท.1/P1	ผลของความยาวคลื่นแสงต่อการเจริญเติบโตและการสะสมน้ำตาลในต้นอ่อนข้าวสาลีพันธุ์ฝาง 60 Effects of Wavelength of Light on the Growth and Sugar Accumulation of Wheatgrass Fahng 60 โดย ศิริชัย สาตร์พันธุ์, พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ, สุรชาติ กมลดิลก และ วิฑูรย์ ยินดีสุข	28
2.	วท.2/P2	Evaluation of Acetylcholinesterase Inhibition Activity of *Picrasma javanica* Bl. extract and Its antimalarial compound, 1-Ethyl-β-carboline By Kamma Rabgay, Juggreewut Junwised, Kanyarat Sompu, Wilasinee Kuangaw, Prapapan Temkitthawon and Chalerm Saiin	36
3.	วท.3/P4	ผลของ 2, 4-D ต่อการชักนำให้เกิดแคลลัสในข้าวพันธุ์ กข43 Effect of 2, 4-D on Callus Induction of Rice (*Oryza sativa* L.) cv. RD43 โดย ปุณดานัย ชิตเพชร, ณรงค์ วงศ์กันทรากร และ ณัฏฐา เสนีวาส	45

หน้า

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

4.	วท.4/P8	ผลของ BA, TDZ และ mT ต่อการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว Effects of BA, TDZ and mT on *in vitro* Culture of *Cymbidium lowianum* Rchb. f. โดย อาทิตยา ทุมมา, ณรงค์ วงศ์กันทรากร และ ประศาสตร์ เกื้อมณี	54
5.	วท.5/P11	การระบุชนิดของโปรตีนไวเทลโลเจนินในน้ำเลือดปูทะเล (*Scylla serrata* Forsskal, 1775) โดยใช้เทคนิค LC-MS/MS Identification of Vitellogenin Protein in Hemolymph of Mud Crab (*Scylla serrata* Forsskal, 1775) using LC-MS/MS technique โดย ธนเสฏฐ์ ทองใสเกลี้ยง	63
6.	วท. 8/P12	ทรานสคริปโตมและการวิเคราะห์ยีนมิกโซไวรัสรีซิสแทนซ์ในปลากัดไทย *Betta splendens* Transcriptome Analysis and Characterization of the Antiviral Myxovirus-Resistance (Mx) Gene of Siamese Fighting Fish *Betta splendens* โดย วลัยพร เจริญทรัพย์ศรี, พัชรี โยควิบูล, ปาริชาติ ชุมทอง, จันทรประภา อิ่มจงใจรัก และ ปิติ อ่ำพายัพ	71
7.	วท.9/P13	Isolation and Characterization of Cartilage Stem/Progenitor Cells from Cartilage Tissue of Osteoarthritis Patients By Sarat Lertjintanakit, Tulyapruek Tawonsawatruk and Patompon Wongtrakoongate	79
8.	วท.10/P14	A Comparison of Two Decontaminating Methods on DNA Content in Ancient Dog (*Canis familiaris*) Bones Excavated from Archaeological Sites in Thailand By Parin Nithijane, Passorn Wonnapinij and Wunrada Surat	86
9.	วท.12/P57	Preparation and Characterization of n-CdS/p-SnS Heterojunction Thin Film Diode By Parichat Cummon, Ngamnit Wongcharoen and Thitinai Gaewdang	94
10.	วท.15/P69	การพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารพิษตกค้างกลุ่มสารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส และสารกลุ่มออกาโนคลอรีนและไพรีทรอยในพืชน้ำมัน Method Validation of Organophosphorus, Organochlorine and Pyrethroid in Vegetable Oil โดย ปิยะศักดิ์ อรรคบุตร, ลมัย ชูเกียรติวัฒนา และ ชนิตา ทองแซม	103

หน้า

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

11.	วท.16/P100	An Approach for Using Electrochemical Impedance Spectroscopy for Testing the Coating Ability of Non-intended BPA Lacquer on Can Surface By Natapol Suetrong and Chaiya Prasittichai	111
12.	วท.18/P102	Silica Based Monolithic Material as Adsorbent for Heavy Metal Ions By Wimonrut Insuan, Bundit Thakummee, KantapongSiriphongsittha, Kritsanachart Sangjhan and Pakphum Simachaya	118
13.	วท.21/P105	Investigation into the effect of colicin N on cancer cell lines By Jesada Pitchayakorn, Chayada Intasuk,Runglada Jiraratmetagon, Kanokpol Apicho, Panuwat Lerdvorasap, Naray Pewnim and Wanatchaporn Arunmanee	126
14.	วท.22/P106	การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อจัดการข้อมูลพืชยึดดิน Information System Development for Managing Soil Stabilization Plants โดย จารุณี พิทยานิวิฏฐ์, อุษา สัมมาพันธ์, อภินิติ โชติสังกาศ และ วรากร ไม้เรียง	134

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

(Subject: Engineering and Architecture)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1.	สถ.วศ.10/O25	อิทธิพลของสารเชื่อมขวาง มวลโมเลกุลของไคโตซาน และการใช้สารลดแรงตึงผิวต่อการสังเคราะห์อนุภาคไคโตซานด้วยวิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน Effect of Cross-linker, Molecular Weight Chitosan, and Surfactant Use on Synthesis of Chitosan Beads using Water-in-oil Emulsion Technique โดย ปิติภาคย์ บุญมี และ นันทิยา หาญศุภลักษณ์	142
2.	สถ.วศ.13/O28	การผลิตอนุภาคโคคริสตัลของยาเมเฟนามิค แอซิดกับพาราเซตามอลและนิโคตินาไมด์ ด้วยกระบวนการ Gas Anti-Solvent (GAS) Production of Mefenamic Acid-Nicotinamide-Paracetamol Cocrystals using Gas Anti-Solvent (GAS) Process โดย ตวงรัตน์ รวบรวม และ มานพ เจริญไชยตระกูล	150
3.	สถ.วศ.27/O86	การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตลิกนินจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร Optimization of Lignin Production from Agricultural Waste โดย วิภาวรรณ กิ่งแก้ว, เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และ อนุสิษฐ์ ธนะพิมพ์เมธา	158

หน้า

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

4.	สถ.วศ.21/O79	ผลของอนุภาคผงยางและสารเชื่อมขวางเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง Effects of Ultrafine Powdered Rubber and Peroxide Crosslinking Agent on Flow-Ability and Mechanical Properties of Recycled High Density Polyethylene โดย <u>นัฐนรี โสภาเจริญวงศ์</u>, รัฐโรจน์ อัครธนกุลกิตติ์, ธีระศักดิ์ หมากผิน, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และ เอกชัย วิมลมาลา	166
5.	สถ.วศ.8/O23	การเคลื่อนที่ของควันซึ่งเป็นผลกระทบจากระดับและตำแหน่งที่เกิดไฟไหม้และเวลาการอพยพคนในอุโมงค์ทางลอดรถยนต์ ประเทศไทย Effects of Fire Elevate and Location on Smoke Movement and Time of People Evacuation in Road Tunnel of Thailand โดย <u>ปัญญวัฒน์ แก้วกุดั่น</u> และ ณัฐศักดิ์ บุญมี	174
6.	สถ.วศ.54/O166	การศึกษาการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุในพืชโดยการใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ Plant Water and Nutrients Uptake Activity via Temperature Measurement โดย <u>ปิยะรส มาลีเจริญ</u>, ชนทัต บุญเฉลียว และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	183
7.	สถ.วศ.18/O62	การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพในการโดยสารของรถไฟฟ้าบีทีเอสชนิด EMU-A1 และ EMU-B1 บนเส้นทางสายสุขุมวิทจากสถานี N8 ถึง สถานี E14 A Comparative Study of Ride Quality between EMU-A1 and EMU-B1 Trains of BTS on Sukhumvit Line from N8 to E14 Stations โดย <u>คณวรรธก์ ใจสะอาด</u>, วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร์ และ วิชัย ศิวะโกศิษฐ	191
8.	สถ.วศ.23/O82	การออกแบบและพัฒนาเครื่องล้างเหง้ามันสำปะหลัง Design and Development of Cassava Root Washing Machine โดย <u>ประสิทธิชัย มะลอย</u> และ ธีรพงศ์ ผลโพธิ์	198
9.	สถ.วศ.24/O83	Comparative Analysis for Thai-Lao Friendship Bridge No.01 Under SRT U20 Train and Full Road Traffic Load By <u>Bounvilay Mixaykham</u>, Prapot Kuntong and Wichai Siwakosit	204
10.	สถ.วศ.44/O156	การวิเคราะห์และออกแบบระบบระบายอากาศในห้องเครื่องทำความเย็น กรณีศึกษา โรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูปแช่แข็ง Analysis and Design of Ventilation System in Refrigerating Machinery Room Case Study Frozen Food Factory โดย <u>ยุพาวรรณ อารีช่วย</u> และ อภิชาต แจ้งบำรุง	210

หน้า

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

11. สถ.วศ.17/O61 การพัฒนาประสิทธิภาพระบบยืนยันตัวตนด้วยกระบวนการยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียว สำหรับระบบสารสนเทศของมหาวิทยาลัย 219
The Improvement of Authentication System for University Applications Using Single Sign-On
โดย มหาราช ทศศะ

12. สถ.วศ.3/O4 การศึกษาผู้โดยสารเพื่อการเปลี่ยนสายในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า ณ สถานีเตาปูน 227
A Study on Transferring Passengers in Morning Peak Time at Tao Poon Station
โดย สุพล วิสุทธิสมบูรณ์ และ วิชัย ศิวะโกศิษฐ

13. สถ.วศ.1/O1 การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากถั่วเหลือง 235
An Experimental Study of Spontaneous Ignition of Soybean Meal
โดย มนตรี เมธาวินวิวัฒน์ และ ณัฐศักดิ์ บุญมี

14. สถ.วศ.2/O2 การศึกษาเชิงทดลองการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของแกลบ 243
Spontaneous Ignition of Husk Experiment
โดย พัชรา วะน้ำค้าง และ ณัฐศักดิ์ บุญมี

15. สถ.วศ.7/O22 แบบจำลอง CFD-DEM ของเมล็ดข้าวโพดในฟลูอิไดซ์เบด 251
CFD-DEM Simulation of Corn Particles in a Fluidized Bed
โดย จักรกฤษณ์ วรรณผ่องใส, ศุภกร เกตุเปลี่ยน และ ปรีดา ปรากฏมาก

16. สถ.วศ.37/O144 การออกแบบกลไก Scotch Yoke เพื่อควบคุมแผ่นบังคับความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิกส์ต้นแบบแบบระบายความร้อนลง 262
Design of Scotch Yoke Mechanism for Damper Blade Control for Downdraft Ceramic Kiln Prototype
โดย สิทธิโชค สืบแต่ตระกูล และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์

17. สถ.วศ.36/O121 การศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 270
A Performance Study of a Stirling Engine
โดย เผชิญ จันทร์สา, อดุลย์ พัฒนภักดี และ วิทยา พันธุ์เจริญศิลป์

18. สถ.วศ.28/O87 การวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของโครงการแหล่งน้ำขนาดเล็ก กรณีศึกษาจังหวัดอุทัยธานี 279
Ranking Analysis of Small Scale Water Resources Project: A Case Study of Uthaithani Province
โดย ภาณุวัฒน์ ศรีชัย, ดีบุญ เมธากุลชาติ และวีระเกษตร สวนผกา

หน้า

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

19.	สถ.วศ.35/O110	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM Comparing the Performance of FLEXL, FLEX-Topo and Modified NAM Models โดย <u>กัมพล อินสว่างวงศ์</u> และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์	287
20.	สถ.วศ.16/O31	การวิเคราะห์แรงดันและคุณภาพน้ำประปาที่พักอาศัยตัวอย่างที่ใช้ระบบถังพักและเครื่องสูบน้ำ Pressure and Water Quality Analysis in Residential Property Using Pump Tank System <u>**ชัยพร เจริญฉิม**</u> ธีรภัทร เรืองสำเร็จ ธรรศ สุรสราญวงศ์ ภานุพงศ์ ชารัตน์ อดิชัย พรพรหมินทร์ และ วุฒินันท์ รักษาจิตร์	296
21.	สถ.วศ.26/O85	การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการแยกน้ำโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน Hydrogen Production by Photocatalytic Water Splitting over Ag-TiO2 powder โดย <u>ชนาธิป แก้วรุ่งฟ้า</u>, กฤษณะ กอบวิทยา และ สัญญา สิริวิทยาปกรณ์	303
22.	สถ.วศ.45/O157	ประสิทธิภาพของเรือเก็บขยะลอยน้ำในทะเล Efficiency of Floating Garbage Collecting Boat in Sea โดย <u>ธุวานนท์ มิ่งเจริญผล</u>, สุชีลา พลเรือง และ วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์	310
23.	สถ.วศ.48/O160	การประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์พร้อมทั้งแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสมสำหรับการจัดประชุมสีเขียวในประเทศไทย Environmental and Economic Assessment along with Appropriate Practice for Green Meeting in Thailand โดย <u>กรรณิการ์ สรกล</u> และ จีมา ศรลัมพ์	319
24.	สถ.วศ.51/O163	การลดเสียงดังจากเครื่องปั๊มโลหะเพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ Noise Reduction from Stamping Machine for Safety to the Operator in Automotive Parts Manufacturing Industry โดย <u>ภาณุวิชญ์ สุภพิชญานันท์</u>, เลิศชัย ระตะนะอาพร และ กฤษ วงษ์เกษม	327

หน้า

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

25. สถ.วศ.5/O15 พฤติกรรมการบดอัดและกำลังอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ 335
Compaction Characteristics and Uniaxial Compressive Strength of Low-quality Crushed Rocks Mixed with Sugar Cane Ash and Cement
โดย ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข, สุนิต ประเวระทัง, สิรวิชญ์ สีหา, ธนนนท์ ฉายาพงศ์, พรเทพ แข็งขัน และ กฤต อินทรกุล

26. สถ.วศ.9/O24 การศึกษาคุณสมบัติของหินคลุกที่ผสมด้วยมวลรวมเปลือกหอยแครงเพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง 344
The Study of Property Mix of Crushed Rock by Cockle Shell Aggregates for Highway Material
โดย ธนโชติ รอดเสวก, ก่อโชค จันทวรางกูร และ ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข

27. สถ.วศ.11/O26 การประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดเพื่อควบคุมฝุ่นในพื้นที่ก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยีไอโอที อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง 352
Application of Measurement System for Dust Control in Construction Site using IOT (Internet of things) Technology.
โดย อดิศักดิ์ ประพันธ์กุล, อภินิติ โชติสังกาศ และ จีมา ศรลัมพ์

28. สถ.วศ.14/O29 การปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันสำหรับทางหลวง 362
Improving Properties of Soil Cement with Palm Oil Fuel Ash for Highway
โดย ชินภพ ชัยมงคล, ก่อโชค จันทวรางกูร และทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข

29. สถ.วศ.32/O89 การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังคุณภาพต่ำโดยตะกรันเตาหลอมเหล็กและปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง 370
Improvement of Low Quality Lateritic Soil using Steel Furnace Slag and Portland Cement for use as Highway Materials
โดย อภิชาติ วงษา, ศุภกิจ นนทนานันท์, สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว และ อัครชัย เรืองแสงทอง

30. สถ.วศ.4/O9 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจในการใช้บริการคาร์แชริ่งในกรุงเทพมหานคร 380
Factors Affecting Consumer Intention to Use Carsharing Service in Bangkok
โดย กรกฎ จันทร์ยวง, สโรช บุญศิริพันธ์ และ วิโรจน์ รุโจปการ

			หน้า
ภาคบรรยาย (Oral Presentation)			
31.	สถ.วศ.15/O30	การประมาณราคาก่อสร้างอาคารของหน่วยงานราชการด้วยแบบจำลองมอนติคาร์โล Cost Estimation of Government Construction Project by Monte Carlo Model โดย ศุภวิชญ์ โสภณสุขสถิตย์ และ ดีบุญ เมธากุลชาติ	391
32.	สถ.วศ.52/O164	ความคิดเห็นของนิสิตต่อการพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่ และระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) จากควันบุหรี่มือสอง ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) Opinions of Students for the Development Smoking Area and PM2.5 Levels from Secondhand Smoke in Faculty of Engineering, Kasetsart University (Bangkhen) โดย กำพล ไพรัชเวชภัณฑ์, วันชัย ยอดสุดใจ, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์ และ วีรชัย ชัยวรพฤกษ์	398
33.	สถ.วศ.20/O64	ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของงานก่อสร้าง กรณีศึกษาสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดสมุทรสาคร The Factors Affecting Delays of Construction Projects: A Case Study of Department of Public Works and Town Planning of Samut Sakhon Province โดย คณาธิป บุญจันทร์ และ ดีบุญ เมธากุลชาติ	406
34.	สถ.วศ.38/O146	การศึกษาพฤติกรรมการใช้อาคาร อุปสรรคและข้อจำกัดทางกายภาพของที่พักอาศัยของผู้สูงอายุภาวะสมองเสื่อมในประเทศไทย The Study of Building Use Behavior, Obstacle and Physical Limitation of Residential Building of Elderly with Dementia in Thailand โดย นวลวรรณ ทวยเจริญ, วนารัตน์ กรอิสรานุกูล, ชติพัทธ์ ณะมณี และ รัชด ชมภูนิช	416
35.	สถ.วศ.42/O150	ต้นทุนที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามการออกแบบเบื้องต้น Cost Optimization of the Reinforced Concrete Columns according to Preliminary Design โดย ไพจิตร ผาวัน, วริสรา เลิศไพฑูรย์พันธ์ และ ศิรินภาพร เกตุพันธ์	424
36.	สถ.วศ.30/O88	พฤติกรรมรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอ Flexural Behavior of Jute FRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams โดย พหลฐวัศ ถนิมพาสน์ และ จักรพันธ์ เทือกต๊ะ	432

หน้า

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

37.	สถ.วศ.43/O151	ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนของเหล็กเสริม กับปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานของกรุงเทพมหานคร Relationship between Reinforcement Corrosion and Chloride Content of Bridge Structures in Bangkok Area โดย <u>อรวีร์ บุญประคอง</u> และ วันชัย ยอดสุดใจ	441
38.	สถ.วศ.12/O27	In-service Subsea Pipeline Anode Life Prediction in Selected Area of Gulf of Thailand (GoT) by Numerical Method By <u>Suratchata Suankem</u> and Wanchai Yodsudjai	449
39.	สถ.วศ.19/O63	การพัฒนาคุณสมบัติคอนกรีตด้วยวัสดุคริสตัลไลน์และการจ่ายกระแสไฟฟ้า Development of Concrete Properties by Mixed with Crystalline Materials and Applied with Electricity โดย <u>วงศธร รังสินธุ์</u>, วันชัย ยอดสุดใจ และ ศุภพัชรี รอดเดชา	457
40.	สถ.วศ.47/O159	ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน เทียบกับสภาพนำไฟฟ้าในคอนกรีต ด้วยวิธีการเร่งสนิมแบบต่างๆ Relationships between Half-cell Potential and Corrosion Current Density with Electrical Conductivity of Concrete Prepared by Various Corrosion Accelerating Methods โดย <u>พงษ์พัฒน์ อิ่มน้อย</u> และ วันชัย ยอดสุดใจ	466

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1.	สถ.วศ.29/P51	การประมาณรังสีดวงอาทิตย์ในระนาบเอียงและมุมเอียงที่เหมาะสมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย Estimation of Solar Radiation and Optimum Tilt Angles of Solar Collector in Thailand โดย <u>ศิษฏ์พริษฐ์ พลตื้อ</u> และ ชาญณรงค์ อัศวเทศานุภาพ	476
2.	สถ.วศ.55/P117	การใช้ประโยชน์จากผงอิฐทนไฟทดแทนปูนซีเมนต์ Replacement of Cement in Concrete with Fire Brick Powder โดย <u>อภิรัฐ ฉัตรานุสรณ์</u> และ ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา	485
3.	สถ.วศ.53/P96	การประยุกต์ใช้แบบจำลองการไหล 2 มิติ Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) ในการพยากรณ์น้ำท่าและน้ำท่วม กรณีศึกษาพื้นที่วังตะไคร้ An Application of Two-Dimensional Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model for Flood Forecasting: A Case Study of Wang Ta Krai, Nakhon Nayok Province โดย <u>ภัทรพล มณีแดง</u>, อดิชัย พรพรหมินทร์ และ ดนย์ปภพ มะณี	492

หน้า

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

4. สถ.วศ.31/P52 การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อปริมาณน้ำท่าที่ไหลลง อ่างเก็บน้ำห้วยหลวง จังหวัดอุดรธานี 500
A Study of Land Use Change Impacts on Runoff Discharge In Huay Luang Reservoir, Udon Thani
โดย พิสินี ปฏิพัทธ์ปถวี และ วรรณดี ไทยสยาม

5. สถ.วศ.6/P10 การประเมินความเสี่ยงในงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริมงานก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดขุดหล่อในชั้นดิน กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน 510
Risk Assessment Lifting and Installation steel structure in Diaphragm Walls Construction Case Study of Metro Subway Construction Project
โดย ณัฐดนัย ใจคุ้มเก่า และ พิพัฒน์ สอนวงษ์

6. สถ.วศ.34/P54 การศึกษาศักยภาพของพื้นที่เพื่อพัฒนาที่อยู่อาศัยในพื้นที่โดยรอบท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ 517
A Study of Potential Area for Housing Development in Surrounding Area of Suvarnabhumi Airport
โดย ดนัย ศรีสังวร และ สญชัย ลบแย้ม

7. สถ.วศ.33/P53 การทำนายอายุการใช้งานที่เหลือของฉนวนหม้อแปลงกำลัง 525
Predicting the Remaining Lifetime of Power Transformer Insulation
โดย นาตยา คล้ายเรือง, อรอุไร หนูหอม และ ณัฏฐพงศ์ ศรแจ่ม

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Subject: Agro-Industry)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. อก.10/O81 Application of Linear Programming Techniques in Porridge Development for the Elderly 535
By Sujaree Khatcha, Suteera Vatthanakul and Saowanee Lertworasirikul

2. อก.11/O119 Analysis of Food Safety Management System in the Frozen Seafood Manufacturing Process in PT. XYZ Indonesia 543
By Ukhi Werdi Pratami and Thanit Puthpongsiriporn

3. อก.15/O134 Antibacterial Activity and Foaming Ability of Selected Surfactants 551
By Suchawadee Loyawattananan and Chitsiri Rachtanapun

หน้า

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

4.	อก.18/O135	Effect of Different Rice Flours and Milk Types on Physical and Sensory Properties of Rice Pudding By <u>Le Ngoc Phuong Uyen</u> and Wannasawat Ratphitagsanti	559
5.	อก.13/O120	การคำนวณสูตรอาหารไก่อินทรีย์ด้วยกำหนดการเชิงเส้น Organic Chicken Feed Formulation by Linear Programming โดย <u>วราลี พุทธรัสสุ</u> และ ปรารถนา ปรารถนาดี	566
6.	อก.19/O136	คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ชและแป้งข้าวจากข้าวแอมิโลสสูง Textural Properties of Fresh Rice Noodles Made from Starch and Flour of High Amylose Rice Cultivars โดย <u>เกียรติศักดิ์ ปุหิ้น</u>, Mika Fukuoka และ สาวิตรี รัตนสุมาวงศ์	574
7.	อก.27/O137	อิทธิพลของวงสังคมใกล้ชิดที่มีต่อความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายในกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวาย Effect of Inner Circle on the Intention to Buy Facial Care Products for Men of Generation Y Metrosexual Consumers โดย <u>ศิรประภา ผ่องบุรุษ</u> วัชรพงศ์ เลิศสุรวัฒน์ และ อัจฉรา เกษสุวรรณ	582
8.	อก.36/O200	การลดกากและตะกอนในน้ำสมุนไพรขิงด้วยเทคโนโลยีไฮโดรไซโคลนร่วมกับสารรวมตะกอนไคโตซาน Reducing Sediment in Ginger Juice with Hydrocyclone Technology and Chitosan Flocculant โดย <u>พิชัย สร้อยสน</u> และ วิยงค์ กังวานศุภมงคล	590

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1.	อก.1/P3	Immunomodulatory Activities of Extracted Okra Mucilage (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) in THP-1 Macrophage Cell Model By <u>Soranan Tieobut</u>, Ladda Sangduean Wattannasiritham and Wasaporn Chanput	599
2.	อก.2/P19	ผลของคาราจีแนน กลูโคแมนแนน และโลคัสบีนกัม ต่อเนื้อสัมผัสและลักษณะทางประสาทสัมผัสในผลิตภัณฑ์เยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่ม Effect of Carrageenan Konjac Glucomannan and Locust Bean Gum on Texture and Sensory Characteristics of Roselle Jelly Drink โดย <u>วรลักษณ์ แสงธาราทิพย์</u>, อนุวัตร แจ้งชัด และ กมลวรรณ แจ้งชัด	607

หน้า

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

3. อก.3/P20 การพัฒนาเค้กสปันจ์ลดแคลอรี่เพื่อสุขภาพ ด้วยแป้งมันม่วงและอินูลิน 615
Development of Healthy Reduced-calorie Sponge Cake with Purple Sweet Potato Flour and Inulin
โดย ชัญญา สิทธิอำนวย และ เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล

4. อก.4/P44 ศักยภาพของเปลือกกล้วยในการผลิตสารสีและสารลดคอเลสเตอรอลด้วยวิธีหมักแบบอาหารแข็ง 623
A Potentiality of Banana Peel on Cholesterol-Lowering Agent and Pigments Production Under Solid State Fermentation
โดย ลลิตา คชารัตน์, ประภัสสร รักถาวร, วราภา มหากาญจนกุล, อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ และ เกสรี กลิ่นสุคนธ์

5. อก.5/P45 คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ และยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของสารสกัดจากเปลือกเงาะเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง 631
Antioxidant and Tyrosinase Inhibition Properties of Extract from Rambutan Peels (*Nephelium lappaceum* L.) for Cosmetic Products
โดย ทิพาพร ทองคำ, อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ, ประภัสสร รักถาวร, เกสรี กลิ่นสุคนธ์, ลลิตา คชารัตน์, สุริสา สากยโรจน์ และ ณัฐภรณ์ เปรสันเทียะ

6. อก.6/P120 การวิเคราะห์ต้นทุนฐานกิจกรรมผลิตภัณฑ์ไหมไทย: กรณีศึกษากลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกหม่อนเลี้ยงไหมบ้านคึมมะอุ 639
Analysis of Activity-Based Costing for Silk Products: A Case Study of Khumma-U Community Enterprise
โดย ณุกานดา เชิดชูธีรกุล, อภิชญา ลีลาวณิชกุล และ กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล

7. อก.7/P46 ผลของสภาวะจำลองระบบการย่อยในทางเดินอาหารในหลอดทดลองต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชัน และฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสจากสารสกัดผสมมะม่วงหาวมะนาวโห่และพลับ 648
Effects of *in vitro* Simulated Gastrointestinal Digestion on the Antioxidant and α-Glucosidase Inhibitory Activities from a Mixed Extract of *Carissa carandas* Linn. and *Diospyros kaki* L.
โดย เกสรี กลิ่นสุคนธ์, อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ, ประภัสสร รักถาวร, ลลิตา คชารัตน์, สุริสา สากยโรจน์, ทิพาพร ทองคำ และ ณัฐภรณ์ เปรสันเทียะ

8. อก.8/P48 การปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในธัญพืช 656
Occurrence of Ochratoxin A in Cereal
โดย ฐิตาภรณ์ รัดริน, อดิศร เจตนะจิตร, รัชนี รักษ์สัตยานันท์, กนกวรรณ พลฉิม และ ทวีศักดิ์ ทองงามดี

หน้า

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

9.	อก.9/P49	ศักยภาพของสารสกัดเปลือกผลไม้ไทยเพื่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคโนโลยีสีเขียว A Potential of Thai Fruit Peel Extracts for Green Synthesis of ZnO Nanoparticles โดย <u>สุริสา สากยโรจน์</u>, ประภัสสร รักถาวร, อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ, เกสรี กลิ่นสุคนธ์, ลลิตา คชารัตน์, ณัฐภรณ์ เปรสันเทียะ และ ทิพาพร ทองคำ	664
10.	อก.12/P64	Characteristics of Baked Spinach with Cheese after Treated by High Pressure Processing By <u>Chutima Mattar</u>, Wannasawat Ratphitagsanti and Phunsiri Suthiluk	672
11.	อก.14/P65	การผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์จากชานอ้อยด้วยเอนไซม์ไซลาเนสหยาบของ *Thermobifida fusca* PA 1-1 Xylo-oligosaccharide Production from Sugarcane Bagasse Using Crude Xylanase of *Thermobifida fusca* PA 1-1 โดย <u>ปวริศา อัตรัง</u>, ปาริชาติ ศรีระพันธุ์, มังกร โรจน์ประภากร และ วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา	680
12.	อก.16/P71	Effect of Calcium Concentration on Properties of Tapioca Starch Gel Containing Alginate By <u>Duanggamol Jullapanya</u>, Pattharasuda Hanucharoenkul and Rungnaphar Pongsawatmanit	688
13.	อก.21/P74	การศึกษาปริมาณสารเพิ่มความหนืด ขนาดและปริมาณเนื้อลำไยที่เหมาะสมในเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่มสำหรับผู้สูงอายุ A Study of the Concentrations of Thickening Agent, the Size and Quantity of Longan Pulp in Longan Tea Mixed with Herb for Elderly Consumers โดย <u>อนุวัตร แจ้งชัด</u> พรรณนิภา ศิริพันธ์ กมลวรรณ แจ้งชัด สายน้ำผึ้ง ทองใส และ วรรณารัตน์ ลีสุขสวัสดิ์	696
14.	อก.22/P75	ผลของสารฆ่าเชื้อที่ใช้ในการล้างต่อการยืดอายุการเก็บรักษามะพร้าวตัดแต่ง Effects of Sanitizers on Shelf-life of Fresh-cut Coconut โดย <u>มธุรญา สมจิตร์</u>, วรรณี จิรภาคย์กุล และ ศศิธร ตรงจิตภักดี	704

หน้า

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

15.	อก.23/P76	Inclusivity and Exclusivity of Multiplex PCR for Specific Detection of Shiga Toxin-producing *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* By <u>Chanokchon Jaroenporn</u>, Damkerng Bundidamorn, Pathima Udompijitkul, Anunchai Assawamakin and Sudsai Trevanich	712
16.	อก.25/P78	การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวเมื่อผ่านกระบวนการความดันสูง Study of Quality Changes of Rice Beverage after Treated by High Pressure Processing during Extended Storage โดย <u>ณัฐสินี ด้วงแก้ว</u>, วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช และ พันธ์สิริ สุทธิลักษณ์	720
17.	อก.26/P79	Scale Down Method and Determination of the Best Condition of Vacuum Tumbling for Cooked Frozen Chicken Breast Strips By <u>Picchapa Harnkasem</u> and Sirichai Songsermpong	728
18.	อก.28/P80	อิทธิพลของลำดับการย้อมที่มีต่อการย้อมสีย้อมธรรมชาติจากเปลือกมะพูดและครามบนผ้าไหม Effect of Dyeing Sequence in Dyeing of Natural Dyes from *Garcinia Dulcis* Bark and Indigo on Silk Fabric โดย <u>นภาวรรณ มาตรเจริญ</u> และ ขนิษฐา วัชราภรณ์	736
19.	อก.29/P81	การศึกษาและพัฒนากระบวนการย้อมสีกกทอเสื่อด้วยสีธรรมชาติจากครั่ง Study and Development Process for Reed Dyeing with Natural Dyes Using *Laccifer lacca* Keer โดย <u>เกศศิณี นามกร</u>, พรเพ็ญ อาธรกิจวัฒน์ และขนิษฐา วัชราภรณ์	743
20.	อก.31/P83	Quality Modification of the Reformed Chicken Meat Using Xanthan Gum for Nugget Preparation By <u>Panusorn Choosuk</u>, Patchara Damkrut and Rungnaphar Pongsawatmanit	751
21.	อก.33/P94	ผลของการปรับปรุงคุณภาพกาแฟโรบัสต้าด้วยกระบวนการพรีทรีตเมล็ดกาแฟดิบ Effect of Robusta Coffee Quality Improvement by Pretreatment of Green Coffee Bean โดย <u>อชิตพล ธีระเรืองไชยศรี</u>, ปิยะวัฒน์ จูรณสิริพงศ์, อัญชิษฐา ฤกษ์คุณาทัย และ สิชญา สิทธิพจน์	759

หน้า

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

22.	อก.34/P118	ผลของแป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า และสารปรับปรุงเนื้อสัมผัสต่อคุณภาพอาหารว่างชนิดแท่งอบกรอบจากฟักทอง Effects of Corn Flour, Rice Flour and Texture Improver on the Quality of the Stick Crispy Snack from Pumpkin โดย ชฎาพร จันบำรุง, กมลวรรณ แจ้งชัด และ อนุวัตร แจ้งชัด	767
23.	อก.35/P119	การวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่าของผลิตภัณฑ์หนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (โอทอป): กรณีศึกษา ผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูป The Value Chain Analysis of One Tambon One Product (OTOP): Case Study in Processed Fruit Product โดย บัณฑิต อินณวงศ์, ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์, กนกวรรณ กิ่งผดุง, นารีนาถ พวงจีน และ จารุวรรณ มารุจกล้า	775

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources and Evrironment)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1.	ทส.8/O65	Water Footprint of Rice Production for Individual and Large-Scale Farmers in Phichit Province of Thailand By Tharinee Senakum, Noppol Arunrat, Nathsuda Pumijumnong, Worachart Wisawapipat, Winai Chaowiwat and Uthai Chareonwong	784
2.	ทส.2/O12	การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม Removal of Natural Organic Matter by Alum Coagulation โดย ศิริพร สิงขโรทัย และ ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา	794
3.	ทส.9/O66	การประยุกต์ใช้การประมาณค่าเชิงพื้นที่เพื่อติดตามความเค็มในดินพื้นที่ศึกษาลุ่มน้ำบางปะกงและแม่กลองตอนล่าง Application of Spatial Interpolation for Soil Salinity Monitoring: A Case Study of Lower Bang Pakong and Mae Klong River Basins โดย เปรมศิริ คงเส้ง, อรยา สมรูป, กนกศักดิ์ ชาญกล และ ปริเวท วรรณโกวิท	802
4.	ทส.3/O13	ความคิดเห็นขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ Forest Industry Organization Opinions on Development of Logging Machinery Power Sources โดย ชัยฉัตร ฉัตรศุภกุล, วันชัย อรุณประภารัตน์ และ ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล	810

หน้า

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

5.	ทส.11/O125	สถานภาพสัตว์ป่าในสภาพกรงเลี้ยงของสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าในประเทศไทย Wildlife Status under Captive Condition at Wildlife Breeding Stations in Thailand โดย สุภาภรณ์ วิสารวุฒิ, รองลาภ สุขมาสรวง และ ประทีป ด้วงแค	818
6.	ทส.21/O202	ความหนาแน่น และการเคลื่อนที่ตามฤดูกาลของกิ้งก่าเขาเล็ก (*Acanthosaura lepidogaster*) ในป่าดิบเขาบริเวณพื้นที่สงวนชีวมณฑลแม่สา-คอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ Seasonal Density and Movement of Cuvier's Spiny Lizard (*Acanthosaura lepidogaster*) in Hill Evergreen Forest, Mae Sa–Kog Ma Biosphere Reserve, Chiang Mai Province โดย บงกชรัตน์ ภัทรมนัส, ปานวริศร์ ปานศรี, ศุภลักษณ์ ศิริ, ยุวดี พลพิทักษ์, อภิษฎา เรืองเกตุ, ยอดชาย ช่วยเงิน และ ประทีป ด้วงแค	826
7.	ทส.13/O171	ผลกระทบของไฟต่อการเติบโตและการเจริญทดแทนตามธรรมชาติในป่าเต็งรังผสมสน โครงการหลวงบ้านวัดจันทร์ จังหวัดเชียงใหม่ Effect of Fire on Growth and Natural Regeneration in Pine-Dipterocarp Forest at Ban Watchan Royal Project, Chiangmai Province โดย เพ็ญสุรัศมิ์ เกียรติโภคะ, กอบศักดิ์ วันธงไชย และ วาทินี สวนผกา	835
8.	ทส.5/O37	การมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร กรณีศึกษา คลองนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง Public Participation in the Conservation of Water Onion: Case Study from Khlong Naka, Suk Samran District, Ranong Province โดย นิติญา สังขนันท์, ธิดารัตน์ คำล้อม และ ขนิษฐา อีดเกิด	843
9.	ทส.1/O11	บทบาทและความพร้อมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อการทำหน้าที่คณะกรรมการป่าชุมชน ระดับจังหวัด : กรณีศึกษาจังหวัดสุราษฎร์ธานี Roles and Readiness of Stakeholders to Perform the Provincial Community Forest Committee: Case Study of Surat Thani Province โดย พงศ์นรินทร์ ไชยกรด, สุรินทร์ อ้นพรม และ รัชนี โพธิแท่น	852
10.	ทส.16/O173	การพัฒนาแนวทางการดำเนินงานสำหรับศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ The Development of Implementation Guidelines for Forest Nursery Station of Bangkok โดย ธัญญาทิพย์ หมาดหมีน, นิตยา เมี้ยนมิตร และ พสุธา สุนทรห้าว	860

			หน้า
ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)			
1.	ทส.7/P29	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมทางธุรกิจและความต้องการไม้จากสวนป่า ตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ ในจังหวัดสระแก้ว The Relationship between Business of Environment and Wood Requirement from Forest Plantation along with Commercial Forest Plantation Act, B.E. 2558 (Issue 2) of Wood Industry Entrepreneurs in Sa Kaeo Province โดย <u>ธนพล โนนเภา</u>, จงรัก วัชรินทร์รัตน์ และ นิคม แหลมสัก	869
2.	ทส.15/P98	การบำบัดโครเมียมในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยการดูดซับด้วยไบโอชาร์แม่เหล็ก Treatment of Chromium in Electroplating Wastewater Using Magnetic Biochar Adsorption โดย <u>พิเศษ กึกสูงเนิน</u> และ ชลอ จารุสุทธิรักษ์	879
3.	ทส.17/P99	ความสัมพันธ์ระหว่างชีพลักษณ์และสัตว์กินผลไม้ ในป่าผสมผลัดใบ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง จังหวัดอุทัยธานี Relationships between Plant Phenology and Frugivores in Mixed Deciduous Forest, Huai Kha Khaeng Wildlife Sanctuary, Uthai Thani Province โดย <u>นรากร โตจิต</u>, วิจักขณ์ ฉิมโฉม, ฉัตรชัย เงินแสงสรวย และ พิไล พูลสวัสดิ์	887

สาขาวิทยาศาสตร์

Subject: Science

ภาคบรรยาย
Oral Presentation

KASETSART UNIVERSITY

การประยุกต์เทคนิคการตรวจจับขอบภาพสำหรับการวัดเส้นสเกล

The Implementation of Edge Detection Technique for Line-Scale Measurement

พนัญญา สมวงษ์[1] นพฤทธิ์ จินันทุยา[1*] และ วิโรจน์ สุดาธรรม[2]

Pananya Somwong[1], Noparit Jinuntuya[1*] and Wiroj Sudatham[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการประยุกต์เทคนิคการตรวจจับขอบภาพของ Sobel, Prewitt และ Canny สำหรับการวัดเส้นสเกล เครื่องต้นแบบประกอบด้วยกล้อง CCD เลนส์ และแหล่งกำเนิดแสง โปรแกรมตรวจจับขอบของเส้นสเกลถูกพัฒนาขึ้นบน python ความถูกต้องของโปรแกรมถูกยืนยันด้วยโปรแกรม MATLAB ภาพถ่ายเส้นสเกลถูกประมวลผลเพื่อหาขอบ จากการวิจัยพบว่ามีความละเอียดในการตรวจจับขอบภาพประมาณ 0.0029 mm ซึ่งถูกสอบเทียบด้วยตารางมาตรฐาน การทดลองเพื่อประยุกต์เทคนิคดังกล่าวในการวัดระยะความยาวตารางมาตรฐานขนาด 0.4 mm และบรรทัดเหล็ก 1.0 mm มีความคลาดเคลื่อนของความยาวที่วัดมากที่สุด 0.0005 mm และ 0.002 mm ตามลำดับ มีความไม่แน่นอนในการวัดประมาณ 0.003 mm ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวอ้างอิงแล้วพบว่าค่าสัดส่วน *E*<1 แสดงถึงความสอดคล้องและใช้ได้ของการวิจัย

ABSTRACT

This paper presents the implementation of edge detection technique for line-scale measurement. Edge detection of Sobel, Prewitt and Canny are applied to identify edges of line scale. The prototype consists of a CCD-camera, a lens, and a monochromatic ring light. Edge detection software was developed based on python and was verified by MATLAB. The resolution of image pixel is approximately 0.0029 mm. By the proposed method, the length measurement errors are 0.0005 mm and 0.002 mm when apply to measure the calibration grid 0.4 mm and the steel ruler 1.0 mm long. The uncertainty of measurement is approximately 0.003 mm with the confident level of 95%. The E_n ratio is smaller than 1, when compare with the conventional method.

Key words: edge detection, line-scale measurement, non-contact measurement

*Corresponding author; e-mail: fscinpr@ku.ac.th

[1]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี 10120

[2]Dimensional Metrology Department, National Institute of Metrology (Thailand), Pathum Thani 10120

คำนำ

Line scale หมายถึงเครื่องมือวัดกลุ่มความยาวที่มีขีดสเกลเป็นเส้นและค่าความยาวที่ระบุ (Nominal length) มีความยาวแบบเชิงเส้นเทียบกับเส้นอ้างอิง เช่น Standard glass scale, working scale, steel ruler เป็นต้น เพื่อให้ผลการวัดสามารถสอบกลับ (Traceability) ไปยังหน่วยวัดมูลฐาน (SI base unit) เครื่องมือวัดจำเป็นต้องมีการสอบเทียบ (Calibration) ตามวิธีการที่ถูกต้อง งานวิจัยนี้เน้นการประยุกต์เทคนิคการตรวจจับขอบภาพสำหรับการวัดความถูกต้องของความยาวที่ระบุของเส้นสเกลบรรทัดเหล็ก (Steel ruler) ตามมาตรฐาน JIS B 7516: 2005 ซึ่งทำจากเหล็กกล้า (Steel) ที่มีความแข็งไม่น้อยกว่า 400 HV โดยมีความหนาของเส้นสเกลอยู่ระหว่าง (0.1-0.25) mm และมีความถูกต้องของความยาวที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C เท่ากับ [0.10+0.05 x (L/500)] mm เมื่อ L คือความยาวที่ระบุในหน่วย mm ความถูกต้องของความยาวคือความยาวจากเส้นอ้างอิงศูนย์ (Reference/Zero line/End face of scale) ไปยังเส้นกึ่งกลาง (Center line of scale) ของความหนาเส้นสเกล (ยุทธนา, 2009) ที่ระบุดังรูปที่ 1 (Figure 1)

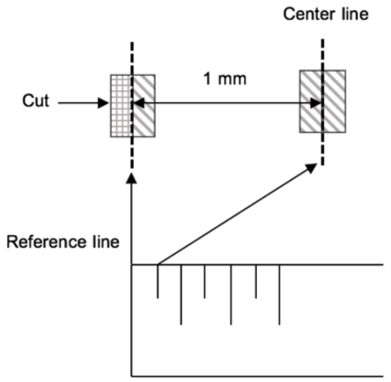


Figure 1 Length of line scale (Metrology Info 53: 12-15).

โปรแกรม Python ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยประยุกต์หลักการหาขอบภาพของ Sobel, Prewitt และ Canny โดยตรวจสอบความใช้ได้ของโปรแกรม (Software validation) เทียบกับ MATLAB งานวิจัยนี้แสดงการสอบเทียบความละเอียด การตรวจจับขอบของเส้นสเกล การวัดความยาวของตารางมาตรฐาน (Standard grid/Calibration grid) และสเกลบรรทัดเหล็ก รวมถึงการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการวัดที่วิจัยขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

การตรวจจับขอบภาพสำหรับการวัดเส้นสเกล

การหาขอบภาพเป็นการประมวลผลจากพิกเซล (Pixel) ข้างเคียงของภาพโดยวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง (Intensity) ขอบภาพคือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงของพิกเซลข้างเคียงต่างกันมากที่สุด (Rafael C. Gonzalez, 2002) หลักการตรวจจับขอบภาพของ Sobel, Prewitt และ Canny (Rafael C. Gonzalez, 2002) ถูกประยุกต์เพื่อหาขอบของเส้นสเกลโดยอาศัยหลักการของอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First derivative) ในการไล่ระดับความเข้มแสงเพื่อหาบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ซึ่งบริเวณนั้นคือขอบของเส้นสเกลที่สนใจ ตารางมาตรฐานถูกวางให้ตั้งฉากและขนานกับแนวเส้นกากบาท (Cross hair) ของกล้อง CCD

เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการจัดแนวการวัด (Alignment error) โปรแกรม Python ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อประมวลผลภาพถ่ายของตารางมาตรฐานและหาจำนวนพิกเซลของตารางมาตรฐานบริเวณพื้นที่สีดำ (Black grid) และพื้นที่สีขาว (White grid) โดยเรียงที่ละแถวในแนวแกน y จากขอบซ้ายถึงขอบขวาในแนวแกน x ของภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2 (Figure 2)

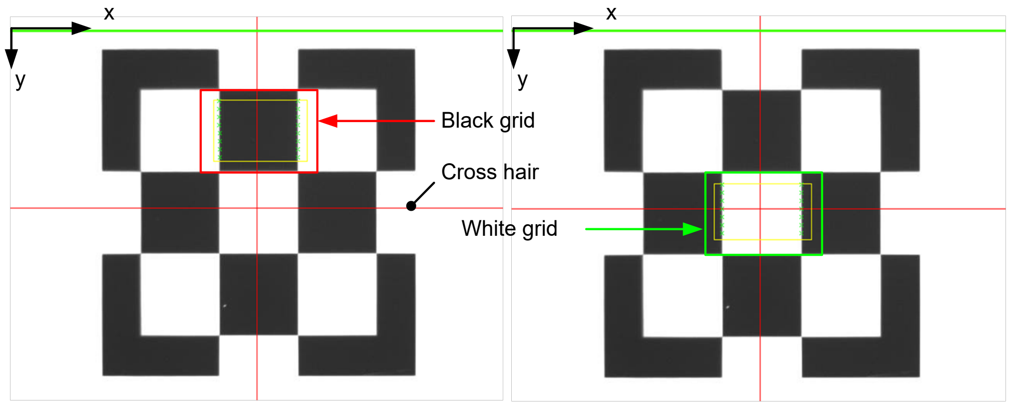


Figure 2 The image of calibration grid.

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โปรแกรม MATLAB ที่มีฟังก์ชันการคำนวนทางคณิตศาสตร์แบบสำเร็จรูป ถูกนำมาใช้หาจำนวนพิกเซลของตารางมาตรฐานตามขั้นตอนเช่นเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบจำนวนพิกเซลโดยเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่ากลาง (Standard deviation of mean)

การสอบเทียบความละเอียดของขนาดพิกเซลภาพ

ภาพจากกล้อง CCD ต้องทำการสอบเทียบความละเอียดของขนาดพิกเซลบนภาพ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวของพิกเซลในแนวเดียวกับการวัด โดยติดตั้งการทดลองดังรูปที่ 3 (Figure 3)

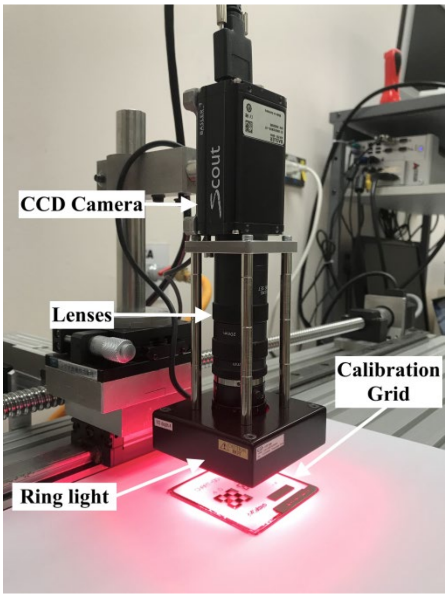


Figure 3 Pixel calibration.

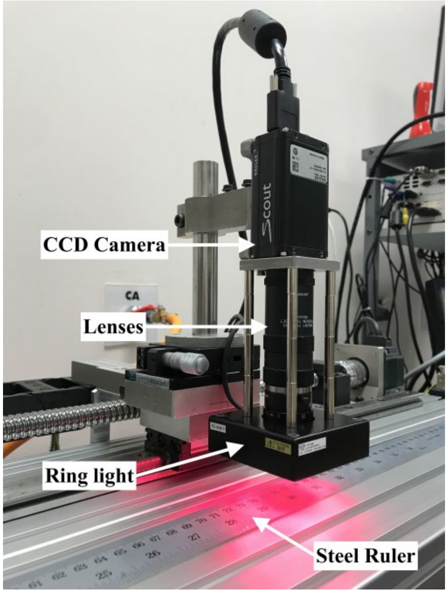


Figure 4 Steel ruler measurement.

ตารางมาตรฐานที่ความยาว 0.99976 mm ถูกใช้สำหรับหาความละเอียดของพิกเซลภาพ เลนส์อัตรากำลังขยาย 35X, 50X และ 90X ถูกใช้ร่วมกับกล้อง CCD เพื่อเพิ่มความเข้มแสงและลดการสะท้อนของพื้นหลัง แสง LED สีแดงความยาวคลื่นเดียว (Red-monochromatic light) ถูกติดตั้งในแนวเดียวกับทิศทางการถ่ายภาพ (NPL Guide, 2014) จากนั้นตารางมาตรฐานถูกถ่ายภาพด้วยอัตรากำลังขยายที่ต่างกันเพื่อหาความสัมพันธ์ของความละเอียดหรือขนาดของพิกเซลภาพที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบนหลักการตรวจจับขอบภาพของ Sobel, Prewitt และ Canny

การวัดขนาดความยาวตารางมาตรฐานและความยาวบรรทัดเหล็ก

ตารางมาตรฐานขนาดความยาว 0.4 mm และบรรทัดเหล็ก 1 mm ถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดของงานวิจัยนี้กับวิธีการวัดอื่น การทดลองนี้ติดตั้งเครื่องมือคล้ายดังรูปที่ 3 (Figure 3) โดยติดตั้งเลนส์ที่มีอัตรากำลังขยาย 90X เนื่องจากการสอบเทียบความละเอียดของขนาดพิกเซลภาพพบว่า มีค่าความละเอียดขนาดของพิกเซลภาพมากที่สุด อย่างไรก็ตามพื้นที่ที่จะสามารถมองเห็นวัตถุ (Field of view) จะลดลงประมาณ 1 mm^2 จึงเป็นเหตุให้ตารางมาตรฐานขนาดความยาว 0.4 mm และบรรทัดเหล็ก 1 mm ถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดของงานวิจัยนี้ วิธีการวัดขนาดความยาวของตารางมาตรฐานถูกวัดจากขอบสเกลด้านซ้ายของภาพ โดยเรียงทีละแถวในแนวแกน y จากขอบซ้ายถึงขอบขวาในแนวแกน x เช่นเดียวกันกับรูปที่ 2 (Figure 2) จากนั้นนำความยาวเฉลี่ยที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจากใบรับรองการสอบเทียบ (Certificate of calibration) สำหรับการวัดบรรทัดเหล็กแสดงดังรูปที่ 4 (Figure 4) ทำการวัดเช่นเดียวกับการวัดตารางมาตรฐาน จากนั้นนำความยาวเฉลี่ยที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่วัดด้วยเครื่อง Mitutoyo Hyper QV 606 PRO/TP Vision System

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลของการตรวจจับขอบภาพสำหรับการวัดเส้นสเกล

การหาจำนวนพิกเซลของตารางมาตรฐานบริเวณพื้นที่สีดำ (Black grid) และพื้นที่สีขาว (White grid) โดยเรียงที่ละแถวในแนวแกน y จากขอบซ้ายถึงขอบขวาในแนวแกน x ของภาพ เพื่อประเมินผลการตรวจจับขอบภาพด้วยหลักการของ Sobel Prewitt และ Canny และตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น แสดงดังตารางที่ 1 (Table 1) เมื่อ n มีค่าเท่ากับ 52

Table 1 Number of pixels between two edges of black and white area of calibration grid (unit: pixel).

Algorithm	White grid				Black grid			
	Python	SD1/	MATLAB	SD1/	Python	SD1/	MATLAB	SD1/
Sobel	340.6154	0.4913	340.6154	0.4913	339.1346	0.4441	339.1346	0.4441
Prewitt	340.6154	0.5297	340.6154	0.5297	339.1538	0.4147	339.1538	0.4147
Canny	340.5962	0.5336	340.5962	0.5336	339.1923	0.4866	339.1923	0.4866

1/ Standard Deviation $= \sigma_{n-1} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$

จำนวนพิกเซลและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ประเมินจากการตรวจจับขอบของตารางมาตรฐาน 52 แถวในแนวแกน y ดังแสดงในรูปที่ 2 (Figure 2) ผลการตรวจจับขอบภาพโดยวิธีการหาจำนวนพิกเซลระหว่างสองขอบด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นและ MATLAB มีความสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้อง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีการกระจายจากค่ากลางประมาณ 0.5 pixel เนื่องมาจากการหาจำนวนพิกเซลระหว่างขอบเป็นการหาในแนวแกน x ของภาพ พบว่าภาพถ่ายของตารางมาตรฐานเอียงจากแนวแกนกากบาทของกล้อง CCD ประมาณ 2 พิกเซล จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนโคไซด์ (Cosine error) ขึ้น ส่งผลให้ขอบของภาพไม่ได้เรียงตัวกันในแนวแกนที่ขนานกับแกน y ของเส้นกากบาท และจำนวนพิกเซลของตารางสีขาวมีมากกว่าตารางสีดำเนื่องจากความยาวของตารางสีขาวกว้างกว่าตารางสีดำ 0.004 mm

ผลการสอบเทียบความละเอียดของขนาดพิกเซลภาพ

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวของพิกเซลในแนวเดียวกับการวัดกับอัตรากำลังขยาย เมื่อวัดเทียบกับตารางมาตรฐานที่มีความยาว 0.99973 mm แสดงดังตารางที่ 2 (Table 2) จากหลักการตรวจจับขอบภาพด้วยอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ทำให้ทราบว่าความละเอียดสูงสุดในการตรวจจับขอบภาพนั้นคือ 1 pixel เนื่องจากขอบภาพถูกพิจารณาจากความต่างของความเข้มแสงของพิกเซลข้างเคียง ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนจากการตรวจจับขอบเส้นสเกลเท่ากับ 2 pixels (2 ขอบ) เมื่อใช้เลนส์อัตรากำลังขยาย 35X, 50X และ 90X จะมีโอกาสคลาดเคลื่อน (Error) ประมาณ 0.020 mm, 0.011 mm และ 0.006 mm ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าการเพิ่มอัตรากำลังขยายจะทำให้ความยาวต่อพิกเซลลดลงแต่ความละเอียดในการตรวจจับขอบภาพนั้นยังคงเป็น 1 pixel และการเพิ่มอัตรากำลังขยายที่สูงเกินไปจะทำให้การมองเห็นขนาดวัตถุ (Field of view) เล็กลงซึ่งจะเห็นภาพเส้นสเกลเป็นจุดส่งผลให้ไม่เหมาะสมต่อการวัดในลักษณะหนึ่งมิติ (1D-measurement) ดังนั้นควรทดแทนการหาขอบโดยวิธี Sub-pixels edge detection เมื่อต้องการความ

ถูกต้องในการวัดที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนความถูกต้อง (Accuracy ratio) กับความถูกต้องของบรรทัดเหล็กแล้ว วิธีการวิจัยซึ่งใช้เลนส์ที่อัตรากำลังขยาย 90X เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งาน

Table 2 The relation of the resolution of image pixel and the magnification.

Algorithm	Magnification	Number of Pixel	L (mm)/Pixel
Sobel	35X	99.8955	0.01001
	50X	186.5821	0.00536
	90X	339.1346	0.00294
Prewitt	35X	99.8955	0.01001
	50X	186.6567	0.00536
	90X	339.1538	0.00294
Canny	35X	99.8358	0.01001
	50X	186.7612	0.00535
	90X	339.1923	0.00294

ผลการวัดขนาดความยาวตารางมาตรฐานและความยาวบรรทัดเหล็ก

จากการทดลองวัดตารางมาตรฐานขนาดความยาว 0.4 mm และบรรทัดเหล็ก 1 mm เปรียบเทียบกับความยาวอ้างอิง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3 (Table 3) เมื่อ n มีค่าเท่ากับ 28 และ 35 ตามลำดับ

Table 3 The measurement results of the calibration grid 0.4 mm and steel ruler 1 mm.

Algorithm	Calibration grid 0.4 mm			
	Reference length (mm)	Measured length (mm)	Error [1/]	SD[2/] (mm)
Sobel	0.39973	0.40015	-0.00042	0.0014
Prewitt		0.40012	-0.00039	0.0010
Canny		0.40021	-0.00048	0.0018
	Steel ruler 1 mm			
	Reference length (mm)	Measured length (mm)	Error [1/]	SD[2/] (mm)
Sobel	1.00250	1.0044	-0.0019	0.0018
Prewitt		1.0038	-0.0013	0.0018
Canny		1.0040	-0.0015	0.0018

1/ Error = Measured length – Reference length

2/ Standard Deviation $= \sigma_{n-1} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$

ความไม่แน่นอนของการวัดขนาดความยาวตารางมาตรฐานและความยาวบรรทัดเหล็ก

ค่าความไม่แน่นอนของการวัดเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงคุณภาพเชิงปริมาณของสิ่งที่ถูกวัด เพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของผลการวัด (EA-4/02 M, 2013) ความคลาดเคลื่อน (Error) ของผลการวัดเส้นสเกลในงานวิจัยนี้แสดงดังสมการที่ (1)

$$Error = l_x + \delta l_m + \delta l_{Res} + \delta l_{align} - l_{ref} - l(\alpha \cdot \Delta T) \quad (1)$$

โดยที่

l_x คือ ความยาวระยะสเกลที่ถูกวัด
δl_m คือ ความไม่แน่นอนของการตรวจจับขอบเส้นสเกล
δl_{Res} คือ ความไม่แน่นอนของความละเอียดขนาดพิกเซลภาพ
δl_{align} คือ ความไม่แน่นอนในการจัดแนวการวัด
l_{ref} คือ ความยาวมาตรฐานที่อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C
l คือ ความยาวที่ระบุ
α คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุทางความร้อน
ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิวัสดุกับอุณหภูมิอ้างอิง 20 °C

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความคลาดเคลื่อนผลการวัดเส้นสเกลในสมการที่ (1) สามารถประเมินความไม่แน่นอนของการวัดดังตารางที่ 4 (Table 4)

Table 4 Measurement uncertainty.

Uncertainty sources	Standard uncertainty, $u(x_i)$	Sensitivity coefficient, c_i	Uncertainty contribution, $u(y_i)$
Edge detection method	0.0002 mm	1	0.0002 mm
Pixel resolution	0.0008 mm	1	0.0008 mm
Alignment error	0.0000 mm	1	0.0000 mm
Reference length	0.0009 mm	-1	-0.0009 mm
Temperature effect	0.577°C	-9×10^{-6} °C^{-1}L	0.0000 mm
Combined Uncertainty	0.0013 mm		
Expended Uncertainty (k =2)	0.0026 mm		

เมื่อ Combined uncertainty คือค่าความไม่แน่นอนรวมและ Expanded uncertainty คือค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การประเมินประสิทธิภาพวิธีการที่วิจัยและความสมเหตุสมผลของความไม่แน่นอนในการวัด โดยวิธีการประเมินค่าสัดส่วน E_n (ISO/IEC 17043, 2010) ผลการประเมินแสดงความสอดคล้อง (Conformity) กับวิธีการมาตรฐานเมื่อ $|E_n| \leq 1$จากการทดลองวัดตารางมาตรฐานขนาด 0.4 mm และ บรรทัดเหล็กความยาวที่ระบุ 1 mm ได้ผลการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ และความสมเหตุสมผลของความไม่แน่นอนในการวัด ดังตารางที่ 5 (Table 5)

Table 5 E_n ratio of proposed method.

Algorithm	Calibration grid 0.4 mm				Steel ruler 1 mm			
	$x-X$ (mm)	U_{lab} (mm)	U_{ref} (mm)	$\|E_n\|$	$x-X$ (mm)	U_{lab} (mm)	U_{ref} (mm)	$\|E_n\|$
Sobel	-0.00042	0.0026	0.0015	0.14	-0.0019	0.0026	0.0015	0.66
Prewitt	-0.00039	0.0026	0.0015	0.13	-0.0013	0.0026	0.0015	0.45
Canny	-0.00048	0.0026	0.0015	0.16	-0.0015	0.0026	0.0015	0.52

เมื่อ $x-X$ คือผลต่างของความยาวที่วัดได้กับความยาวอ้างอิง U_{lab} คือความไม่แน่นอนขยายของการวัดสำหรับงานวิจัยที่นำเสนอ U_{ref} คือความไม่แน่นอนขยายของความยาวที่อ้างอิง และสัดส่วน E_n ประเมินดังสมการที่ (2)

$$E_n = \left| \frac{x-X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \right| \qquad (2)$$

สรุป

การประยุกต์เทคนิคการตรวจจับขอบภาพสำหรับการวัดเส้นสเกลในงานวิจัยนี้ โดยอาศัยหลักการตรวจจับขอบภาพของ Sobel, Prewitt และ Canny มีความไม่แน่แน่นอนในการวัดประมาณ 0.003 mm ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และมีโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนในการยืนยันขอบของเส้นสเกลประมาณ 0.006 mm เมื่อใช้เลนส์ที่มีอัตรากำลังขยาย 90X อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนความถูกต้องของบรรทัดเหล็กแล้ว วิธีการวิจัยนี้ เพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในการสอบเทียบบรรทัดเหล็กต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ทั้งนี้เพราะได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และบุคลากรในการร่วมวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ยุทธนา หงษ์อารมณ์กิจ. 2009. การสอบเทียบไม้บรรทัดเหล็ก. **Metrology Info.** 11(53): 12-15.

Conformity assessment-General requirements for proficiency testing. 2010. **ISO/IEC 17043.**

Coveney, T. 2014. **Measurement Good Practice Guide No.39.** Queen's Printer and Controller of HMSO.

EA-4/02. 2013. **Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration** JIS – Metal Ruler (JIS B 7516)

Rafael, C., Gonzalez and R.E. Wood. 2002. **Digital Image Processing, n.p.:** Prentice Hall.

การออกแบบแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่นโดยใช้ LED ร่วมกับเกรตติงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน

Design of Multispectral Light Source using LED and Reflected Diffraction Grating

จันทร์ฑรัตน์ มากชุม[1] และ นพฤทธิ์ จินันทุยา[1*]

Jantarat Markchum[1] and Noparit Jinuntuya[1*]

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบสร้างแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่น โดยใช้แสงจาก LED หลาย ๆ ตัว ส่องลงไปบนเกรตติงแบบสะท้อน แล้วเลือกแสงเลี้ยวเบนที่มุมจำเพาะ โดยใช้ช่องเปิดแคบสองอันในการกำหนดแนวแสง ในเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ LED จำนวน 5 ดวง วางทำมุมตกกระทบต่างกัน เพื่อให้ได้แสงเลี้ยวเบนที่ความยาวคลื่นในช่วง 480 ถึง 680 nm ค่าความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุด และความกว้างแถบความยาวคลื่นของแสงเลี้ยวเบนจาก LED แต่ละตัว สามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันสเปกตรัมสัมพัทธ์ของ LED ซึ่งสามารถวัดได้โดย spectrophotometer ร่วมกับข้อมูลการแจกแจงความเข้มเชิงมุมสัมพัทธ์ ที่กำหนดจากเอกสารข้อมูลเชิงเทคนิคของ LED จากผลการคำนวณพบว่าค่าความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุดสอดคล้องกับผลการวัดค่อนข้างดี แต่ความกว้างแถบความยาวคลื่นที่ได้จากการคำนวณ แตกต่างกับค่าที่วัดได้พอสมควร อย่างไรก็ตาม แสงที่ได้จาก LED ทุกตัวมีความกว้างแถบความยาวคลื่นที่ค่อนข้างแคบ (< 50 nm) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในการสร้างข้อมูลภาพแบบหลายความยาวคลื่น หรือใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในงาน spectroscopy แทนที่เครื่องแยกความยาวคลื่นที่ใช้กันทั่วไปได้

ABSTRACT

In this study, design and construction of a multispectral light source are presented. Light rays from multiple LEDs are projected on a reflection grating. Two narrow slits are used to select the diffracted ray with a specific angle. In this prototype, 5 LEDs are placed to give different incident angles which result in the diffracted ray with the wavelength range from 480 to 680 nm. The maximum intensity wavelength and bandwidth of the diffracted light from each LED can be calculated from the LED relative spectrum function, which can be measured by a spectrophotometer, together with the angular relative intensity distribution obtained from the data sheet. The calculation results of maximum intensity wavelengths agree well with the measurements, but the bandwidths are quite different. However, the bandwidths of lights from all LEDS are quite narrow (< 50 nm), which is possible to be used as a light source for multispectral imaging. It is also possible to use the system as a replacement of the monochromator in the spectroscopy work.

Key words: Monochromator Design, multispectral light source, LEDs, reflected grating

* Corresponding author; e-mail address: fscinpr@ku.ac.th

[1]สาขามาตรวิทยา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Metrology Program, Department of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การสร้างข้อมูลภาพแบบหลายความยาวคลื่น (Multispectral imaging) คือการนำเสนอข้อมูลภาพโดยใช้แสงในช่วงความยาวคลื่นแคบๆ (~ 20-30 nm) มากกว่า 3 ย่านความยาวคลื่นขึ้นไป ซึ่งจะแตกต่างจากการสร้างข้อมูลภาพในระบบ RGB ตามปกติ ที่จะใช้แสงใน 3 ช่วงความยาวคลื่นที่ค่อนข้างกว้าง (~ 100-200 nm) เลียนแบบการตอบสนองของเซลล์รับแสง (Photoreceptor cell) ที่จอประสาทตา (Retina) ของมนุษย์ การสร้างข้อมูลภาพแบบหลายความยาวคลื่นนี้ จะทำให้ได้ข้อมูลของการตอบสนองของวัตถุที่ก่อให้เกิดภาพ ต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ในรายละเอียด มากกว่าข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพสีทั่วไป ซึ่งปัจจุบันมีการนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ สาขา ทั้งทางการทหาร การรับรู้ระยะไกล (Remote sensing) ทางการแพทย์ การเกษตร หรือแม้กระทั่งในวงการศิลปะ (Belusic *et al.*, 2016; ElMasry *et al.*, 2019; Pelagotti *et al.*, 2008)

วิธีการสร้างข้อมูลภาพแบบหลายความยาวคลื่น สามารถทำได้ใน 2 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ การใช้แสงธรรมชาติ หรือแสงขาวจากแหล่งกำเนิด ส่องไปยังวัตถุที่ต้องการถ่ายรูป แล้วใช้เครื่องมือแยกแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ออกจากกัน เครื่องมือแยกแสงดังกล่าว อาจใช้เป็นปริซึมแยกแสง หรือเกรตติงเลี้ยวเบน เพื่อให้แสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน ไปตกที่ตำแหน่งต่างกันบนฉาก หรืออุปกรณ์รับแสง ซึ่งปัจจุบันมักใช้เป็นตัวรับรู้ CCD หรืออีกวิธีที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันคือการใช้ตัวรับรู้ CCD แบบพิเศษ ที่ติดตั้งตัวกรองแสง (filter) ที่จะยอมให้เฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการเท่านั้นผ่านไปได้ ข้อดีของวิธีข้างต้นคือใช้งานได้สะดวก ไม่ต้องการแหล่งกำเนิดแสงแบบพิเศษ แต่ก็มีข้อจำกัดตรงที่อุปกรณ์มักมีราคาแพง เพราะต้องใช้ CCD ที่มีขนาดใหญ่เป็นพิเศษ เพื่อแยกรับภาพที่หลายความยาวคลื่น และ/หรือต้องติดตั้งตัวกรองแสงที่มีความกว้างแถบความยาวคลื่น (bandwidth) ที่มีค่าความยาวคลื่นเฉพาะในช่วงแคบๆ บน CCD ดังกล่าว

วิธีการสร้างข้อมูลภาพแบบหลายความยาวคลื่นอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นประเด็นที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่สามารถให้แสงหลายความยาวคลื่น ส่องไปยังวัตถุที่ต้องการถ่ายรูป แล้วถ่ายรูปโดยใช้กล้องปกติ หรือกล้องที่ถ่ายรูปแบบสเกลสีเทา (Gray scale) ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถใช้กล้องถ่ายรูปปกติในการเก็บข้อมูลภาพได้ แต่ก็มีประเด็นคือ ต้องมีแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่น ส่องไปยังวัตถุที่ต้องการถ่ายรูป แล้วถ่ายรูปเก็บข้อมูลภาพจากแสงทีละความยาวคลื่นเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป

การสร้างแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่น ที่ให้แสงแต่ละความยาวคลื่นที่มีความกว้างแถบความยาวคลื่นเฉพาะในช่วงแคบๆ อาจทำได้โดยใช้วงล้อตัวกรองแสง (Filter wheel) หรือเครื่องแยกความยาวคลื่น (Monochromator) ในการทำงานของระบบเหล่านี้ จะมีการเคลื่อนที่เชิงกลภายในระบบ เช่น การหมุนวงล้อตัวกรองแสง หรือการหมุนกระจกและเกรตติงในเครื่องแยกความยาวคลื่น ทำให้เกิดข้อจำกัดของเวลาในการเปลี่ยนความยาวคลื่น ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับการถ่ายภาพต่อเนื่อง รวมทั้งอาจมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่เชิงกลดังกล่าวด้วย

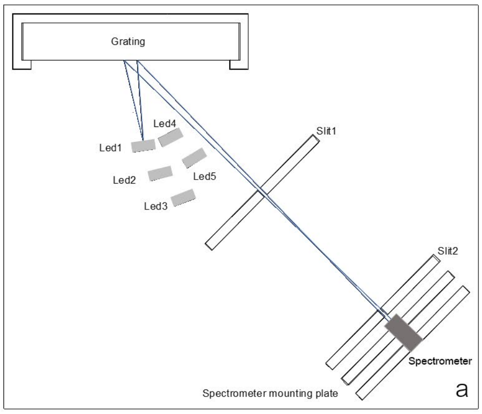
ในงานวิจัยนี้ จะนำเสนอวิธีการสร้างแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่นอีกวิธีหนึ่ง โดยใช้ LED สีขาวชนิดสว่างมาก (Super bright) ส่องแสงไปตกกระทบบนเกรตติงสะท้อน (Reflected diffraction grating) แล้วนำแสงที่เลี้ยวเบนขึ้นมาผ่านช่องเปิดแคบ (Slit) เพื่อให้ได้แสงเลี้ยวเบนที่มุมเฉพาะค่าหนึ่ง ไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง ในที่นี้จะใช้ LED หลายตัว วางในตำแหน่งที่ให้มุมตกกระทบต่างกัน ดังนั้น แสงจาก LED แต่ละตัวเมื่อเลี้ยวเบนจากเกรตติง จะมีความยาวคลื่นเฉพาะ ขึ้นกับมุมตกกระทบของแสงจาก LED ตัวนั้น ข้อดีของวิธีที่นำเสนอในที่นี้

คือสามารถควบคุมการเปิด-ปิด LED แต่ละตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน นอกจากนี้ เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่เชิงกลในระบบ จึงสามารถลดความไม่แน่นอนในส่วนนี้ลงไปได้อีก

นอกเหนือจากการออกแบบโครงสร้างแล้ว ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอกระบวนวิธีเชิงตัวเลข (Numerical algorithm) ที่ใช้คำนวณสเปกตรัมของแสงจากระบบ เนื่องจากลำแสงจาก LED มีลักษณะบานออกเป็นรูปกรวย รวมทั้งช่องเปิดแคบก็มีขนาดความกว้าง ดังนั้น แสงจาก LED แต่ละตัวที่เลี้ยวเบนผ่านออกมา จะมีความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุด และความกว้างแถบความยาวคลื่น ขึ้นกับตำแหน่ง และรูปแบบการกระจายแสง (Illumination profile) ของ LED ตัวนั้นๆ ความสามารถที่จะคำนวณสเปกตรัมของแสง จากโครงแบบ (Configuration) ของระบบ จึงเป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ที่สามารถนำไปใช้ออกแบบแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างในแบบอื่นๆ ได้อีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

โครงแบบของระบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ในรูปแบบของแผนผังและอุปกรณ์จริงแสดงใน Figure 1



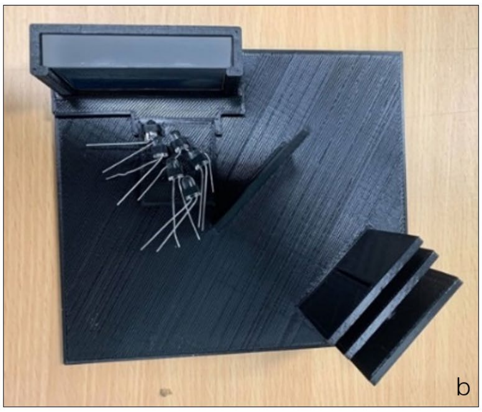


Figure 1 (a) Schematic and (b) actual arrangement of the apparatuses used in this study.

ในที่นี้ใช้ LED สีขาวชนิดสว่างมาก (LTW-2S3D7, Lite-On Inc.) 5 ตัว วางทำมุมต่างกัน ส่องแสงไปยังเกรตติงสะท้อน ที่มีความหนาแน่นของช่องเปิด (Groove density) 1800 mm^{-1} จะพิจารณาเฉพาะแสงเลี้ยวเบนที่ผ่านช่องเปิดแคบ Slit1 และ Slit2 ที่มีขนาดช่องเปิด 1.0 mm และวางห่างจากกันเป็นระยะ 59.0 mm โดยแสงที่ส่องผ่านออกมา จะถูกส่งต่อไปวิเคราะห์ด้วย Spectrophotometer (AvaSpec-2048) เพื่อวัดความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุด และความกว้างแถบความยาวคลื่น ของแสงจาก LED แต่ละตัว การควบคุมการเปิด-ปิด LED ทำผ่าน GPIO ports ของ Raspberry Pi 3 Model B โดยเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยโปรแกรมภาษา python อุปกรณ์พร้อมส่วนควบคุมแสดงใน Figure 2

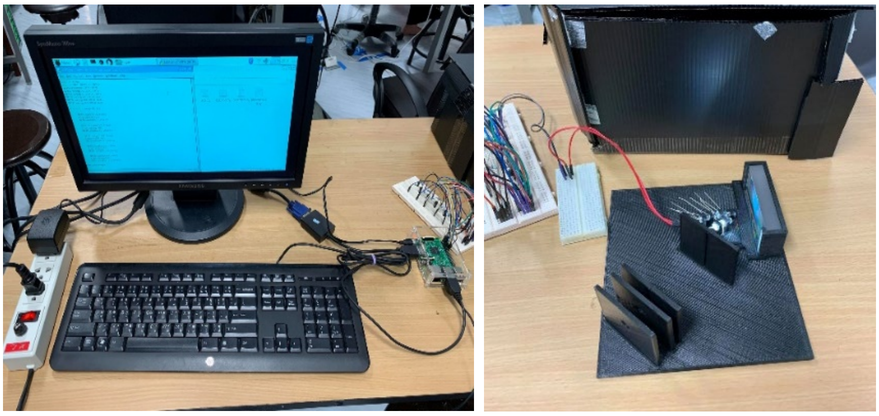


Figure 2 Optical system with Raspberry Pi control unit.

LED1-5 ถูกจัดวางให้แนวแกนทำมุมกับเส้นตั้งฉากจากผิวเกรตติงเป็น 9°, 15°, 21°, 27° และ 33° ตามลำดับ ส่วนแนวเชื่อมต่อจุดกึ่งกลางของ Slit1 และ Slit2 ทำมุม 45° กับเส้นตั้งฉากจากผิวเกรตติง ค่ามุมดังกล่าวอาจถือได้ว่าเป็นค่ากลางของมุมตกกระทบและมุมเลี้ยวเบนของแสงจาก LED ที่ส่องไปยังเกรตติง ที่ทำให้เกิดการแทรกสอดในอันดับที่ 1 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลำแสงจาก LED มีลักษณะบานออกเป็นรูปกรวย รวมทั้งช่องเปิดแคบก็มีขนาดความกว้าง ดังนั้น แสงที่ส่องผ่านช่องเปิดแคบออกไป จะเป็นผลรวมของแสงในช่วงของมุมตกกระทบค่าหนึ่งซึ่งจะส่งผลต่อมุมเลี้ยวเบนและสเปกตรัมของแสงที่ส่องผ่านช่องเปิดแคบโดยรวม

จากโครงแบบของระบบข้างต้น จะสามารถคำนวณความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุด และความกว้างแถบความยาวคลื่นได้ตามกระบวนวิธีดังนี้

1. ความกว้างของช่องเปิดแคบและระยะห่างระหว่างช่องเปิดทั้งสอง จะกำหนดมุมเลี้ยวเบนจากเกรตติงที่เป็นไปได้ ที่แสงจะสามารถผ่านช่องเปิดทั้งสอง ถ้าช่องเปิดทั้งสองกว้าง w และวางอยู่ห่างกัน L และแนวเชื่อมต่อจุดกึ่งกลางของ Slit1 และ Slit2 ทำมุม β กับเส้นตั้งฉากจากผิวเกรตติง มุมเลี้ยวเบนที่เป็นไปได้จะอยู่ในช่วง $\beta \pm \Delta\beta$ เมื่อ

$$\Delta\beta = \arctan w/L \tag{1}$$

2. นอกเหนือจากมุมเลี้ยวเบนที่เป็นไปได้ จะถูกกำหนดโดยความกว้างของช่องเปิดแคบและระยะห่างระหว่างช่องเปิดทั้งสองแล้ว ตำแหน่งของแสงตกกระทบที่จะทำให้เกิดแสงเลี้ยวเบนที่สามารถผ่านช่องเปิดทั้งสองได้ จะขึ้นกับความกว้างของช่องเปิดแคบและระยะห่างระหว่างช่องเปิดทั้งสอง รวมทั้งตำแหน่งและการวางตัวของช่องเปิดเทียบกับเกรตติงด้วย Figure 3 แสดงบริเวณ A ที่แสงตกกระทบในบริเวณนี้ จะมีโอกาสผ่านช่องเปิดแคบทั้งสอง ถ้ามุมเลี้ยวเบนอยู่ในช่วง $\beta \pm \Delta\beta$ ตามข้อ 1.

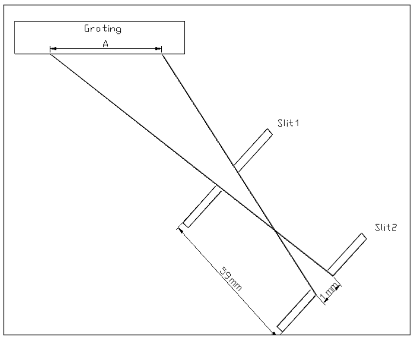


Figure 3 The allow or "A" area that the incident rays can produce the diffracted rays which is possible to pass Slit1 and Slit2.

3. สามารถคำนวณช่วงของมุมตกกระทบ α ของแสงจาก LED ที่ตกลงบนบริเวณ A ได้ จากตำแหน่งและการวางตัวของ LED ตัวอย่างแสดงใน Figure 4

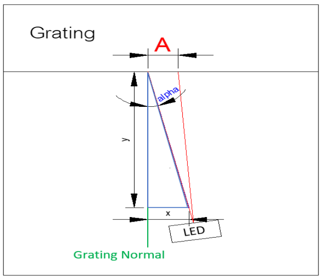


Figure 4 The possible incident angle from an LED on the A area.

4. ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบ α มุมเลี้ยวเบน β ความยาวคลื่น λ และความกว้างของช่องเปิด $d = 1/N$ (เมื่อ N คือความหนาแน่นของช่องเปิด) จะเป็นไปตามสมการเกรตติง (grating equation) (Palmer 2014)

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda \tag{2}$$

เมื่อ m คืออันดับของการแทรกสอด ในที่นี้จะพิจารณาการแทรกสอดอันดับ 1 ($m = 1$) เท่านั้น

5. พิจารณาแสงจาก LED ที่ตกกระทบเกรตติง ที่ค่าความยาวคลื่น λ ค่าหนึ่ง ความเข้มรวมของแสงเลี้ยวเบนที่ผ่านช่องเปิดแคบทั้งสอง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I(\lambda) = S(\lambda)R_t(\lambda) \tag{3}$$

เมื่อ $S(\lambda)$ คือ ฟังก์ชันสเปกตรัมสัมพัทธ์ (relative spectrum function) ของแสงจาก LED ซึ่งวัดได้จาก spectrophotometer ส่วน $R_t(\lambda)$ คือฟังก์ชันความเข้มลัพธ์สัมพัทธ์ (total relative intensity) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$R_t = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} R(\alpha)\,d\alpha \tag{4}$$

เมื่อ $R(\alpha)$ คือการแจกแจงความเข้มเชิงมุมสัมพัทธ์ (angular relative intensity distribution) ซึ่งกำหนดจากข้อมูลเชิงเทคนิคของ LED ส่วนค่า α_1 และ α_2 คือขอบเขตของมุมตกกระทบของแสงจาก LED บนพื้นที่ A ที่ให้มุมเลี้ยวเบนอยู่ในช่วง $\beta \pm \Delta\beta$ จะเห็นว่า R_t เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น λ ผ่านค่ามุมตกกระทบ α_1 และ α_2 ตามสมการเกรตติง (2)

6. จากฟังก์ชัน $I(\lambda)$ ที่ได้ จะสามารถนำไปเขียนเป็นกราฟของสเปกตรัมของความเข้มของแสงที่ผ่านช่องเปิดแคบ ที่ความยาวคลื่นต่าง เพื่อนำไปหาค่าความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุด และความกว้างแถบความยาวคลื่นได้ต่อไป

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากความกว้าง w = 1.0 mm และระยะห่าง L = 59.0 mm ของช่องเปิด Slit1 และ Slit2 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงใน Figure 5 สามารถคำนวณค่า $\Delta\beta$ จากสมการ (1) ได้เท่ากับ 0.97° ดังนั้น มุมเลี้ยวเบนที่เป็นไปได้จะอยู่ในช่วง β = 44.03° – 45.97°

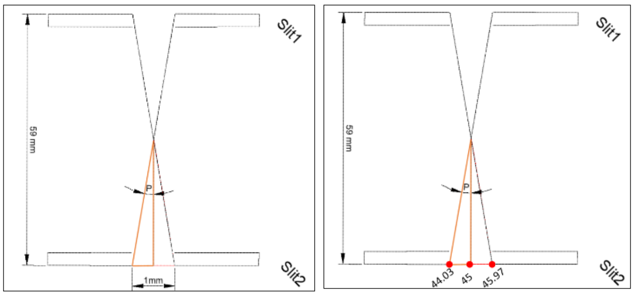


Figure 5. Possible diffracted angle of rays to pass the Slit1 and Slit2.

จากค่ามุมเลี้ยวเบนที่ได้ข้างต้น พบว่า มุมตกกระทบที่เป็นไปได้ของแสงจาก LED ทั้ง 5 ตัว จะมีค่าดังแสดงใน Table 1

Table 1 Range of possible incident angles from LEDs.

LED number	1	2	3	4	5
α_{min} (deg)	4.5	11.8	18.6	22.9	30.2
α_{max} (deg)	13.5	18.2	23.2	31	35.8

ฟังก์ชันสเปกตรัมสัมพัทธ์ของ LED วัดโดย spectrophotometer (AvaSpec-2048) แสดงใน Figure 6 (a)

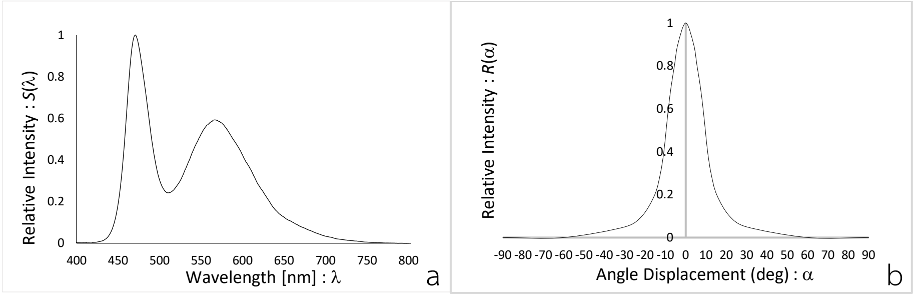


Figure 6 (a) Relative spectrum function and (b) angular relative intensity distribution of LEDs used in this study.

การแจกแจงความเข้มเชิงมุมสัมพัทธ์ กำหนดจากเอกสารข้อมูลเชิงเทคนิคของ LED (Product Data Sheet: LTW-2S3D7. 2012) แสดงใน Figure 6 (b)

จากข้อมูลทั้งหมดข้างต้น สามารถคำนวณสเปกตรัมของความเข้มของแสงที่เลี้ยวเบนผ่านช่องเปิดแคบทั้งสอง เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ตามสมการ (2) – (4) ผลการคำนวณค่าความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุดและความกว้างแถบความยาวคลื่น (ในที่นี้วัดจากค่า Full Width Half Maximum: FWHM) เทียบกับผลการวัดจาก spectrophotometer แสดงใน Table 2

Table 2 Comparisons of Peak wavelengths and FWHM of intensity spectrum from calculation and direct measurement.

LED	Angle of incidence of LED axis (deg)	Calculation		Measurement	
		FWHM (nm)	Max Peak (nm)	FWHM (nm)	Max Peak (nm)
1	9	31.5	480	32.0	481
2	15	36.3	545	42.0	548
3	21	31.3	590	34.0	586
4	27	41.5	630	50.0	628
5	33	22.5	680	35.0	674

จาก Table 2 จะเห็นว่า แสงที่ได้จาก LED แต่ละตัว เมื่อเกิดการเลี้ยวเบนและส่องผ่านช่องเปิดแคบออกมา จะมีความยาวคลื่นในช่วงแคบๆ (< 50 nm) ในส่วนของค่าความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุด หากคำนวณจากสมการ (4) โดยตรง โดยใช้มุมระหว่างแนวแกนของ LED และแนวเชื่อมต่อจุดกึ่งกลางของ Slit1 และ Slit2 เทียบกับแนวเส้นตั้งฉากจากผิวเกรตติง เป็นมุมตกกระทบและมุมเลี้ยวเบนตามลำดับ จะได้ค่าความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุดที่ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง แต่เมื่อใช้กระบวนวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ พบว่า ได้ผลการคำนวณค่าความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุดสอดคล้องกับผลการทดลองค่อนข้างดี อย่างไรก็ตาม ความกว้างแถบความยาวคลื่นที่ได้จากการคำนวณ แตกต่างกับค่าที่วัดได้พอสมควร ในประเด็นนี้ผู้วิจัยสันนิษฐานว่า อาจเป็นเพราะข้อมูลการแจกแจงความเข้มเชิงมุมสัมพัทธ์ของ LED จากเอกสารข้อมูลเชิงเทคนิค เป็นค่ากลางจากโรงงาน

ซึ่งรูปร่างของการแจกแจงของ LED แต่ละตัวน่าจะแตกต่างออกไป เมื่อใช้ค่านี้ในการคำนวณ อาจทำให้รูปร่างของสเปกตรัมของความเข้มของแสงที่เลี้ยวเบนผ่านช่องเปิดแคบมีความคลาดเคลื่อน ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการคำนวณความกว้างแถบความยาวคลื่นที่ได้ดังกล่าว ตัวอย่างผลการคำนวณสเปกตรัมของแสงจาก LED แสดงใน Figure 7

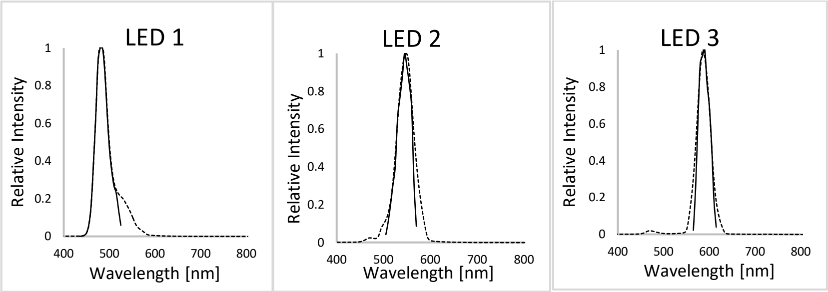


Figure 7 Intensity spectrums of diffracted light from LEDs, obtained from calculation (solid line) and direct measurement (dash line).

สรุป

จากผลการศึกษาที่ได้นำเสนอข้างต้น จะเห็นว่า แหล่งกำเนิดแสงที่สามารถให้แสงหลายความยาวคลื่นที่สร้างขึ้น สามารถให้แสงที่มีความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุดตามที่กำหนด ซึ่งสามารถคำนวณค่าความยาวคลื่นได้ตามกระบวนวิธีที่ได้นำเสนอ แสงที่ได้มีความกว้างแถบความยาวคลื่นที่ค่อนข้างแคบ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในการสร้างข้อมูลภาพแบบหลายความยาวคลื่น ลำแสงที่ได้จากระบบมีขนาดเล็ก จึงเหมาะสมที่จะนำไปถ่ายภาพร่วมกับกล้องจุลทรรศน์ เพื่อศึกษาระบบทางชีววิทยา หรือใช้ถ่ายภาพวัตถุขนาดเล็ก เช่นในงาน microelectronics นอกจากนี้ ยังสามารถนำแหล่งกำเนิดแสงนี้ไปใช้ในงาน spectroscopy แทนที่เครื่องแยกความยาวคลื่นขนาดใหญ่ที่ใช้กันทั่วไปได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

Belusic G., M. Ilic, A. Meglic and P. Pirih. 2016. A fast multispectral light synthesiser based on LEDs and a diffraction grating. **Scientific Reports** 6: 32012.

ElMasry G., N. Mandour, S. Al-Rejaie, E. Belin and D. Rousseau. 2019. Recent applications of multispectral imaging in seed phenotyping and quality Monitoring-An overview. **Sensors** 19: 1090.

Pelagotti A., A. Del Mastio, A. De Rosa and A. Piva. 2008. Multispectral imaging of paintings. **IEEE Signal Processing Magazine** 25: 27-36.

Product Data Sheet: LTW-2S3D7. 2012.n.p.: LITE-ON Technology Corp.

Palmer, C. 2014. **Diffraction Grating Handbook**. N.p.: Newport Corporation.

Expression of the Biological Clock Gene, *timeless* in Malaria Vector, *Anopheles dirus* (Diptera: Culicidae) under the Effect of Global Warming

Thananya Comproh[1], Uraiwan Arunyawat[2], Sungsit Sungvornyothin[3] and Waraporn Juntarajumnong[1*]

ABSTRACT

The biochemical pathways of the circadian clock-controlled (host seeking behavior) for the variety of *Anopheles* mosquito's behavior and its malaria transmissions involved with the "*timeless (tim)*" gene. Our main objective was to investigate that increasing of rearing temperature might be affecting changes of daily expression of *tim* expression gene in *Anopheles dirus*. 120 males and females of *An. dirus* were used. A cohort of synchronized samples were maintained for three days under normal condition in which the period of light and darkness is in equal length (12:12 hours) at 25°C, 27°C and 29°C, respectively. Ten adults of both sexes were collected every 2 hours during 24 hours-period. Real-time PCR was conducted by "Bio-Rad CFX Manager 3.0. The daily expression of *tim* gene in each group of 3 different temperatures was analyzed by relative quantification via real-time PCR into the "mean relative expression cycle threshold" $2^{(-\Delta\Delta CT)}$ values. Changes in relative abundance of *An. dirus*' *tim* gene in Light: Darkness (LD) 12:12, started from 07:00 h to 05:00 h of the next day. The daily expression of *tim* gene at LD12:12 provided the highest peak of 25°C at 23:00 h 27°C at 01:00 h and 29°C at 03:00 h respectively. The daily expression *An. dirus*'s *tim* gene occurred during the darken-period in all three different temperatures. Rising of temperature had significantly affected the expression of the timeless gene in *An. dirus*. An in-dept investigation on *timeless* gene toward the population dynamics in *An. dirus* mosquitoes is recommended.

Key words: *Anopheles dirus*, *timeless* gene, temperature, biological clock

* Corresponding author; e-mail address: waraporn2521@gmail.com

[1] Department of Entomology, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2] Department of Entomology, Faculty of Genetics, Kasetsart University, Bangkok 10900

[3] Department of Medical Entomology, Faculty of Tropical Medicine, Mahidol University, Bangkok 10400

INTRODUCTION

Malaria is a serious tropical disease presented in the developing country. This disease mainly affects low and/or lower-middle income countries, especially in the areas where the effective services for prevention, diagnosis and treatment are hardly to access (WHO, 2018). In the South-East Asia, malaria is the most important vector-borne disease. About 2.5 million cases of malaria are reported annually, but it is estimated that as many as 100 million cases may occur in the region each year with approximately 26,000 deaths per year (Manguin *et al*., 2008). In Thailand, malaria has been found mainly along the international border. Over 49% of malaria cases has been reported in Thai-Myanmar border (BVBD, 2013). There are about 74 *Anopheles* species were found in Thailand (Somboon and Rattanarithikul, 2013). Only two species complexes and one group are considered to be major malaria vectors: *Anopheles dirus* complex, *Anopheles minimus* complex and *Anopheles maculatus* group (Suwonkerd *et al.,* 2013).

An. dirus complex is one of major vector playing significance role in malaria transmission. It is a forest and forest-fringe inhabiting mosquito that demonstrates seasonal and geographic variation in biting cycles. At least five species member of *An. dirus* complex have been found in Thailand.

Rhythmic biological processes (synchronizing their physiology, metabolism and behavior to the Earth's geophysical cycles within a period of about 24 hours) are widespread in living organisms (Gentile *et al.,* 2006). Since these rhythms are close to, but not exactly 24 hours, they are called circadian rhythm. Circadian rhythms are controlled by biological clocks. The biological clocks are self-sustainability or free-running even in the absence of periodical input from external factors, the endogenous rhythms persist with a period close to 24 hours.

Studies on the insect model *Drosophila melanogaster* indicate that the circadian pacemaker is controlled by number of genes which generate interlocked transcriptional/translational feedback loops with a period of around 24 hours. The main genes constitute the center of the first feedback loop are "timeless (*tim*)", period (*per*), clock (*clk*), cycle (*cyc*), vrille (*vri*) and PAR-domain protein 1 (Pdp1). Two of them, *clk* and *cyc*, encode transcription factors that together form the heterodimer CLK-CYC which activates the expression of "*tim*" and per (Hardin, 2005). While in the mosquito, the circadian rhythms have been comprehensively studied, both in the wild and in laboratory conditions. They show an incredible variation of flight activity behaviors that can be affected by several factors such as nutritional and mating status, temperature and light intensity (Clements, 1999).

The main objective of this study was to investigate that increasing of rearing temperature might be affecting the changes of the daily expression of "*tim*" expression gene in *An. dirus*.

MATERIALS AND METHODS

1. Mosquito strain

An. dirus laboratory strain was used in this study. They are maintained continuously at Department of Medical Entomology, Faculty of Tropical Medicine, Mahidol University.

2. Collection of mosquito

The 120 males and 120 females of *An. dirus* (3-5 day-old) were separated to plastic cup with screen tops (10 mosquitoes of each sex per cup) and cotton wool soaked with 10% sugar solution were provided as food. These cups were placed in the incubator (Accuplus microprocessor control incubator i250®) to be synchronized their endogenous clock for three days under normal condition in which the period of light and darkness (LD) is equal length (12:12 hours) at temperature 25°C and light intensity 208 lux. Ten adults of both sexes were collected every 2 hours for 24 hours. The mosquitoes were kept at -80°C for RNA extraction. For the mosquitoes of the 27°C and 29°C groups, they were treated the same sampling procedure as those 25°C group, except the increasing of temperature of 2°C and 4°C.

3. RNA extraction

The RNA extractions were done using the "FavorPrep™ Tissue total RNA purification mini kit". Pool samples of ten mosquitoes in each tube were ground the whole body in liquid nitrogen then transferred the powder to a new microcentrifuge tube. The 350 µl of FARB Buffer (β-Mercapto ethanol added) was added to the tube and sheared by pestle. The homogenize was incubated at room temperature for 5 minutes. A Filter Column was placed into a Collection Tube. The sample mixture was then transferred to the "Filter Column" and centrifuged at full speed for 2 minutes. The clarified supernatant was transferred from Collection Tube to a new microcentrifuge tube. The 70% ethanol was added to the clear lysate and mixed well by pipetting. A FARB Mini Column was placed into a Collection Tube. The added-ethanol sample was transferred to FARB Mini Column, centrifuged at full speed for 1 minute and discarded the flow-through The 500 µl of Wash Buffer 1 was added to wash FARB Mini Column and centrifuged at full speed for 1 minute then discarded the flow-through The FARB Mini Column was washed twice with 750 µl of Wash Buffer 2 by centrifugation at full speed for 1 minute then discarded the flow-through After that, it had undergone another centrifugation at full speed for an additional 3 minutes to dry the column. The FARB Mini Column was placed in Elution Tube. The 50 µl of RNase-free ddH2O was added to the membrane center of FARB Mini Column, then allowed it to stay in the FARB Mini Column for another minute (for an effective elution, making sure that RNase-free ddH2O was dispensed on the membrane center and was absorbed completely). The FARB Mini Column was centrifuged at full speed for 2 minutes to elute RNA. All RNA extractions were stored at -80°C.

4. Eliminate genomic DNA contamination

The “Thermo scientific DNase I, RNase-free” was used to remove genomic DNA from RNA preparations. A master mix was prepared in RNase-free tube (RNA 1 µl, buffer 1 µl, DNase I (1U) 1µl and DEPC-treated water 7 µl). Then, it was incubated at 37°C for 30 minutes. The 1 µl of 50 mM EDTA was added to a master mix and mixed together. A master mix was incubated at 65°C for 10 minutes. After that the RNA was ready to be used as a template for reverse transcription.

5. Primer design

The *timeless* primer was designed by *tim* cDNA alignment of *Aedes albopictus*, *Aedes aegypti*, *Anopheles gambiae*. The *rps7* primers were used to amplify *rps7* gene as a constitutive control in studies of clock gene expression. These primers were designed by *rps7* cDNA alignments of *Ae. albopictus*, *Ae. aegypti*, *An. gambiae*, *Anopheles stephensi*, *Culex quinquefasciatus*, *Armigeres subalbatus*.

6. Reverse transcription (cDNA synthesis)

The “ReverTra Ace® qPCR RT Master Mix” was used for reverse transcription (cDNA synthesis). The RNA template for reverse transcription was incubated at 65°C for 5 minutes, and then kept on ice. The master mix reagent was prepared on ice with 5x RT Master Mix, RNA template and Nuclease-free water. The master mix was incubated at 37 °C for 1 hour, incubated at 50°C for 5 minutes and heated at 98°C for 5 minutes, respectively. Finally, cDNA was stored at 4°C or -20°C.

7. Real-time Polymerase Chain Reaction

Real-time PCR was conducted by “Bio-Rad CFX Manager 3.0”. The reaction was done using KAPA SYBR® FAST qPCR Kit Master Mix (2X) Universal. The qPCR master mix was prepared in 10 µl of 2X KAPA SYBR® FAST qPCR Master Mix Universal, 0.4 µl of 10 µM forward primer, 0.4 µl of 10 µM reverse primer, cDNA template as required and adjusted the volume up to 20 µl by PCR-grade water. The qPCR was run by following steps starting from enzyme activation at 95°C for 3 minutes, denaturation at 95°C for 1-3 seconds, annealing/data acquisition at 60°C for ≥ 20 seconds, the last 2 steps were repeated for 40 cycles. The results were analyzed using $2^{(-\Delta\Delta CT)}$ method for relative quantifications.

8. Calculation of qPCR Data Using Double Delta Cycle Threshold Analysis

a) Averaging the Ct values [Gene being Tested Experimental (TE), Gene being Tested Control (TC), Housekeeping Gene Experimental (HE), and Housekeeping Gene Control (HC)] for the housekeeping (*RPS7*) gene and the gene being tested (*“tim*” gene).
b) Calculating the differences between TE and HE (TE-HE) and TC and HC (TC-HC) [the ΔCt values for the experimental (ΔCTE) and control (ΔCTC) conditions]

c) Calculating the difference between ΔCTE and ΔCTC (ΔCTE-ΔCTC) at the Double Delta Ct Value (ΔΔCt).

d) Calculating the value of $2^{(-\Delta\Delta CT)}$ [using logarithm base 2, when DNA increased by twice, the Ct values decrease by 1] to get the expression fold change.

RESULTS AND DISCUSSION

The daily expression of the "timeless (*tim*)" gene in *An. dirus*, in each group of three different temperatures (25°C, 27°C, 29°C) was analyzed by calculating the relative quantification via real-time PCR into the "mean relative expression cycle threshold" $2^{(-\Delta\Delta CT)}$ values. The changes in relative abundance of *An. dirus*'s *tim* gene throughout 24h period in Light: Darkness (LD) 12:12, started from 07:00 h to 05:00 h of the next day for the total of 24 times, were observed and recorded. The final mean relative expression Ct values were averaged at each recording hours.

Results were showed in Figure 1-4. Values on the 'x' axis represent the Zeitgeber time (ZT) of 24 hours-period which starting 1 hour after the lights-on (ZT 1) and finishing 11 hours after the lights-off (ZT 23). Gray background illustrates the darken phase while the white background depicts the light phase. Values on the 'y'-axis correspond to the mean relative expression of *timeless* quantified by real-time PCR.

For the 25°C group, from the starting time at 07:00 h and continued to 13:00 h, there were no significant changes observed in the mean relative expression Ct values of *"tim"* gene. When approaching 15:00 h, there was a minor rise and slightly dropped off to its original level at 21:00 h A maximum rise in mean relative expression of *"tim"* gene to its peak (2.27) was observed at 23:00 h Within the next 6 hours-period, it started to drop off to almost the lowest level as it appeared at the beginning (Figure 1). An ANOVA showed no significant differences of mean relative expression Ct values of "tim" gene between 15:00 h and 19:00 h ($p = 0.06$), but significant differences between 15:00 h and 21:00 h ($p = 0.03$); 23:00 h and 01:00 h ($p<0.001$).

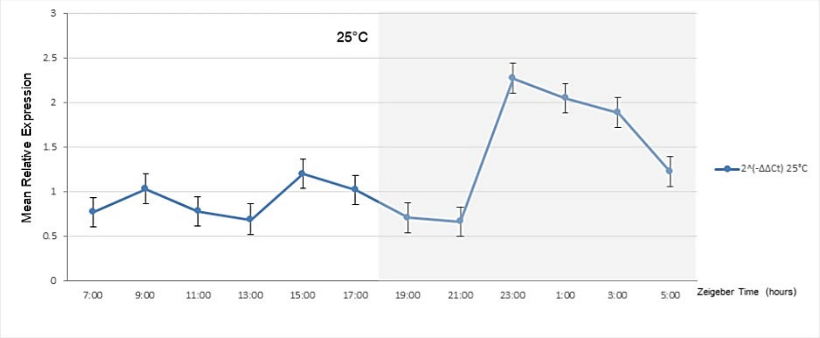


Figure 1 Daily expression of the "timeless (*tim*)" gene of *An. dirus* in LD12:12 at temperature 25°C, showing the highest peak of mean relative expression (2.27) at 23:00 h.

For the 27°C group, there were slightly fluctuated of the mean relative expression Ct values of *“tim”* gene observed from the starting time at 07:00 h to the first 12 hours-period at 19:00 h Unlike the pattern observed in the 25°C-group, a continuing and major rise of the mean relative expression Ct values was observed from the 21:00 h until reached its peak (2.10) at 01:00 h After that, it started to decline for the next 12 hours-period until reached the lowest value at 09:00 h where it stayed that low for the next 8 hours-period until the 19:00 h (Figure 2). An ANOVA only showed significant differences between 13:00 h and 01:00 h ($p< 0.001$).

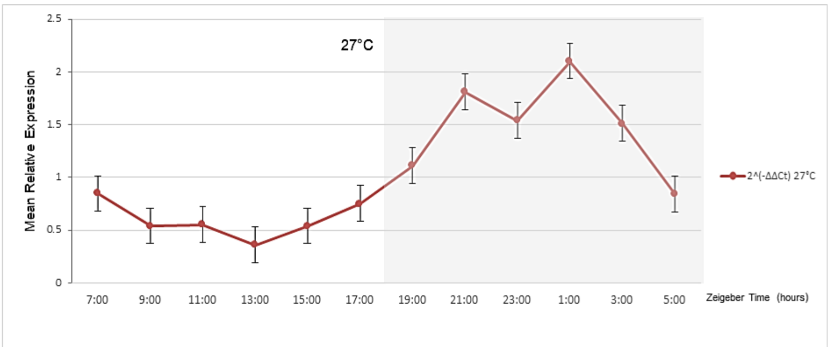


Figure 2 Daily expression of the “timeless (*tim*)” gene of *An. dirus* in LD12:12 at temperature 27°C, showing the highest peak of mean relative expression (2.10) at 01:00 h.

For the 29°C group, the mean relative expression Ct values of “*tim”* gene during the first 6 hours-period, from 07:00 h to 13:00 h were at low points with a minor rise in between at 09:00 h It briefly showed a major rise at 15:00 h before slightly dropped off at 17:00 h and stayed almost the same levels for the next 4 hours-period until it reached 23:00 h A significantly increased was started to observe at 01:00 h which it continued to reach the highest peak (1.75) at 03:00 h After that, it just dropped off (Figure 3). An ANOVA showed significant differences of mean relative expression Ct values of “*tim”* gene between 23:00 h and 03:00 h (p <0001).

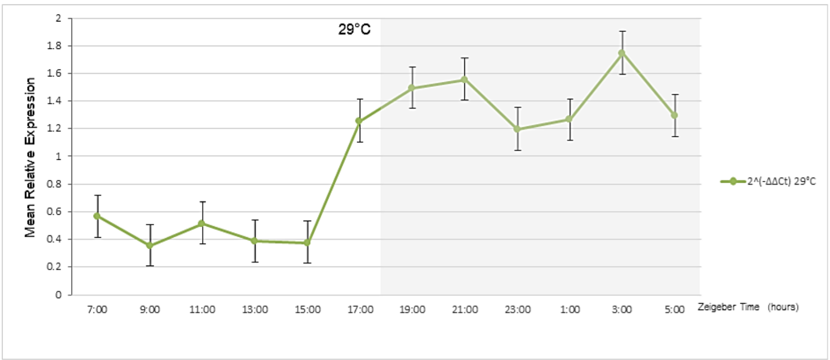


Figure 3 Daily expression of the “timeless (*tim*)” gene of *An. dirus* in LD12:12 at temperature 29°C, showing the highest peak of mean relative expression (1.75) at 03:00 h.

However, the statistical analysis (ANOVA) on the daily expression of the *timeless* gene of *An. dirus* in LD12:12 at all three temperatures (25°C, 27°C and 29°C), the results revealed that at 23:00 h there were significant differences of mean relative expression Ct values of *"tim"* gene between temperature 25°C and 27°C (*P-value* = 0.006); 25°C and 29°C (*P-value* <0.001). At 01:00 h, there was significant difference between temperature 25°C and 27°C (*P-value* = 0.006). While, at 01:00 h, there were no significant differences between 25°C and 27°C; 25°C and 29°C, respectively (Figure 4).

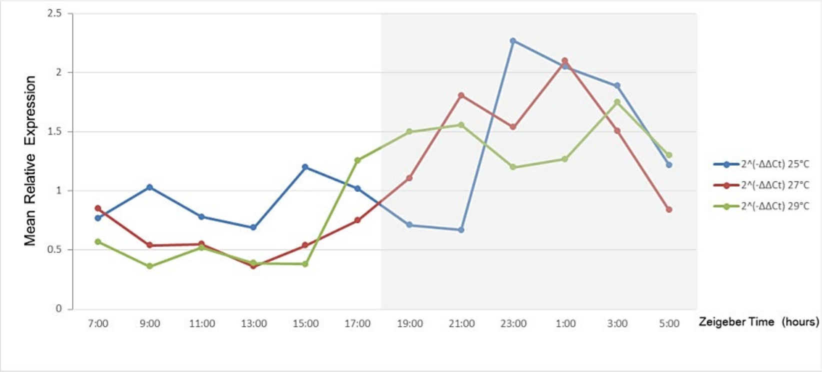


Figure 4 Daily expression of the "timeless (*tim*)" gene of *An. dirus* in LD12:12 at three temperatures (25°C, 27°C and 29°C).

In this study, we had demonstrated the effect of rising of temperature, by 2 °C and 4°C, toward the changing the daily expression of "timeless (*tim*)" – [Biological Clock] gene in *Anopheles* mosquitoes during the darken period. The "*tim*" gene was found to be a key factor to regulate circadian mechanisms (host seeking behavior) among several insect as reported by Gentile et al., (2005 and 2006) in *Drosophila*; *Anopheles aquasalis* (Neotropical malaria vector) and *Ae. aegypti* (vector of Dengue hemorrhagic fever). Hardin (2005) studied the "*tim*" gene in *Drosophila* and reported that it has a crucial role in the control of the central pacemaker and the resetting mechanism that allows the clock to synchronize with the environment light–dark cycles. (Gentile *et al.,* 2005). Gentile *et al.* (2005) revealed the "*tim*" gene in *Ae. Aegypti* shows a peak in mRNA abundance around the light–dark transition. They also compared their results with *D. melanogaster* and found that it demonstrated high similarity in some important domains and suggested functional conservation. Beck-Johnson *et al.* (2013 and 2017) in their study on changes of this "*tim*" gene that could be caused by any environmental factors, especially by the fluctuation of temperatures had been, revealed that the increasing of temperature influenced the biochemical pathways of the circadian clock-controlled for the variety of critical behavior of *Anopheles* mosquitoes related to mosquito population dynamics and the potential of malaria transmission.

Our findings revealed the changes of daily expression of *"tim"* gene of *An. dirus* affected by the increasing of temperature during the darken period which related to their host seeking time, as most

Anopheles mosquitoes are nocturnal insect vectors. Therefore, any changing in the expression of "*tim*" gene in mosquitoes by the temperature fluctuations could be related as well as responded to the impacts of diurnal (*Aedes*) and nocturnal (*Anopheles*) mosquito population dynamics.

CONCLUSION

The daily expression from real-time PCR of the "timeless gene (*tim*)" in *An. dirus* at LD12:12 provided the highest peak of *"tim*" gene of 25°c at 23:00 h, 27°C at 01:00 h and 29°c at 03:00 h respectively. The increasing of temperature, by 2°c, had significantly affected the expression of the *"tim*" gene in *An. dirus*. The daily expression *An. dirus*'s *tim* gene occurred during the darken-period in all 3 different temperatures observed in this study. Rising of temperature had significantly affected the expression of the timeless gene in *An. dirus*. An in-dept investigation on *timeless* gene toward the population dynamics in *An. dirus* mosquitoes is recommended.

REFERENCES

Bureau of Vector Borne Disease [BVBD]. 2013. **Annual Report on Malaria Situation 2013**. Nonthaburi, Thailand. Department of Disease Control. Ministry of Public Health. 143pp.

Beck-Johnson, L.M., W.A. Nelson, K.P. Paaijmans, A.F. Read, M.B. Thomas, O.N. Bjørnstad. 2013. The Effect of Temperature on *Anopheles* Mosquito Population Dynamics and the Potential for Malaria Transmission. **PLOS ONE** 8: 1-11.

Beck-Johnson, L.M., W.A. Nelson, K.P. Paaijmans, A.F. Read, M.B. Thomas, O.N. Bjørnstad. 2017. The Importance of Temperature Fluctuations in Understanding Mosquito Population Dynamics and Malaria Risk. **Royal Society Open Science.** 4: 1-12.

Clements, A.N. 1999. The Biology of Mosquitoes: Sensory Reception and Behaviour. United State: Chapman & Hall, University of Michigan,

Gentile, C., A.C.A. Meireles-Filho, C. Britto, J.B.P. Lima, D. Valle and A.A. Peixoto. 2006. Cloning and Daily Expression of the Timeless Gene in *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). **Insect Biochemistry and Molecular Biology** 36: 878-884.

Gentile, C., Lima, J.B.P., Peixoto, A.A., 2005. Isolation of a fragment homologous to the rp49 constitutive gene of Drosophila in the Neotropical malaria vector *Anopheles aquasalis* (Diptera: Culicidae). Mem. **Instituto Oswaldo Cruz** 100: 545–547.

Hardin, P.E. 2005. The Circadian Timekeeping System of Drosophila. **Current Biology** 15: 714-722

Manguin, S., C. Garros, I. Dusfour, R.E. Harbach and M. Coosemans. 2008. Bionomics, Taxonomy, and Distribution of the Major Malaria Vector Taxa of *Anopheles* Subgenus *Cellia* in Southeast Asia: An Updated Review. **Infection, Genetics and Evolution** 8: 489-503.

Somboon, P. and R. Rattanarithikul. 2013. **Mosquito Surveys, Rearing, Preservation of Mosquito Specimens and Identification of Anopheles in Thailand.** Nonthaburi, Thailand: Department of Disease Control, Ministry of Public Health.

Suwonkerd, W., W. Ritthison, C.T. Ngo, K. Tainchum, M.J. Bangs and T. Chareonviriyaphap. 2013. Vector Biology and Malaria Transmission in Southeast Asia, pp. 273-325 in S. Manguin., eds. ***Anopheles*** **Mosquitoes-New Insights into Malaria Vectors.** Rijeka, Croatia: InTech Open Access.

World Health Organization. 2018. **World Malaria Report 2014**. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

สาขาวิทยาศาสตร์

Subject: Science

ภาคโปสเตอร์
Poster Presentation

KASETSART UNIVERSITY

ผลของความยาวคลื่นแสงต่อการเจริญเติบโตและการสะสมน้ำตาลในต้นอ่อนข้าวสาลีพันธุ์ฝาง 60
Effects of Wavelength of Light on the Growth and Sugar Accumulation of Wheatgrass Fahng 60

ศิริชัย สาตร์พันธุ์[1*] พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ[1] สุรชาติ กมลดิลก[1] และ วิฑูรย์ ยินดีสุข[1]

Sirichai Sartpan*, Pichet Limsuwan[1], Surachart Kamoldilok[1] and Witoon Yindeesuk[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความยาวคลื่นแสงจากไดโอดเปล่งแสงต่อการเจริญเติบโตและการสะสมน้ำตาลในต้นอ่อนข้าวสาลีพันธุ์ฝาง 60 ไดโอดเปล่งแสงที่ใช้มีสีแดง สีน้ำเงิน สีเขียว และสีขาว โดยใช้อัตราส่วนผสมของสีต่างๆ ดังนี้ แสงสีแดงต่อแสงสีน้ำเงินในอัตราส่วน 1:1 แสงสีแดงต่อแสงสีน้ำเงินต่อแสงสีเขียวในอัตราส่วน 1:1:1 แสงสีแดงต่อแสงสีน้ำเงินต่อแสงสีขาวในอัตราส่วน 1:1:1 และแสงสีขาว ที่ความเข้มแสง 50 μmolm^{-2}s^{-1} โดยการให้แสงในโรงเรือนปิดตามอัตราส่วนดังกล่าวเป็นเวลา 7 วัน วันละ 16 ชั่วโมง แล้ววัดน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ความยาวต้น ความยาวราก ปริมาณน้ำตาล ผลการทดลองพบว่าต้นอ่อนข้าวสาลีที่ปลูกภายใต้อัตราส่วนของแสงสีแดงต่อสีน้ำเงิน ในอัตราส่วน 1:1 ให้น้ำหนักของต้นสดสูงสุดเท่ากับ 0.1464 กรัมต่อต้น น้ำหนักของต้นแห้งสูงสุดเท่ากับ 0.1004 กรัมต่อต้น และความยาวของต้นสดสูงสุดเท่ากับ 19.42 เซนติเมตร จากการตรวจวัดชนิดของน้ำตาลในต้นอ่อนข้าวสาลีพบเฉพาะน้ำตาลฟรุกโตสโดยพบปริมาณฟรุกโตสสูงสุดในต้นอ่อนข้าวสาลีที่ปลูกภายใต้แสงสี : สีน้ำเงิน : สีเขียว ในอัตราส่วน 1:1:1 เท่ากับ 8.2912 มิลิกรัมต่อลิตร

ABSTRACT

In this research, the effects of wavelength of light from light emitting diode (LED) on the growth and sugar accumulation of wheatgrass Fahng 60 were studied. The light sources used were red (R), blue (B), green (G) and white (W) LEDs. Four ratios of light mixture, i.e. R:B ratio 1:1, R:B:G ratio 1:1:1:, R:B:W ratio 1:1:1 and W, each ratio with a light intensity of 50 μmolm^{-2}s^{-}. The experiments were performed in a closed farm house by exposing the wheatgrass with those light ratios for 7 days, 16 h for each day. Then, the weights of fresh and dry wheatgrass, the lengths of the shoot and root of fresh wheatgrass and sugar content were measured. The results were found that the wheatgrass grew under R:B ratio 1:1 yield a maximum weight of fresh and dry wheatgrasses of 0.1464 and 0.1004 g/plant, respectively, and a longest length of fresh wheatgrass of 19.42 cm.The investigation of sugar content revealed that only fructose contained in wheatgrass with a maximum fructose content of 8.2912 mg/l.

Key words: LED, wheatgrass, sugar accumulation

* Corresponding author; e-mail address: 61605077@kmitl.ac.th

[1] *ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520*

[1] Department of Physics ,Faculty of Science, Kingmongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

คำนำ

ต้นอ่อนข้าวสาลีหรือวีทกราส (Wheatgrass) เป็นต้นอ่อนที่เพาะจากเมล็ดแล้วเก็บเกี่ยวใน 1 สัปดาห์ แล้วนำต้นอ่อนมาคั้นน้ำเพื่อนำมาบริโภคหรือนำต้นอ่อนไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ หรือแม้กระทั่งนำไปเป็นอาหารให้กับสัตว์เลี้ยง ซึ่งต้นอ่อนข้าวสาลีอุดมไปด้วยคลอโรฟิลด์และธาตุอาหารชนิดต่างๆ ปัจจุบันได้มีเกษตรกรปลูกจำหน่ายต้นอ่อนข้าวสาลีสดหรือคั้นน้ำขายให้กลุ่มผู้บริโภคและแปรรูปเป็นแคปซูล อย่างไรก็ตาม กลุ่มเกษตรกรมีความต้องการที่จะพัฒนาการเพาะต้นอ่อนข้าวสาลีเพื่อให้ได้ต้นอ่อนข้าวสาลีที่มีคุณภาพสูง ในงานวิจัยของ สาธิตและคณะ (2555) ได้มีการพัฒนาวัสดุเพาะต้นอ่อนข้าวสาลีพบว่าฟางสับเป็นวัสดุเพาะที่ทำให้น้ำคั้นต้นอ่อนข้าวสาลีมีความหวานสูงกว่าวัสดุเพาะชนิดอื่นแต่ให้น้ำหนักของต้นอ่อนน้อยกว่าวัสดุเพาะชนิดอื่นทำให้ได้น้ำคั้นที่มีความหวานสูงสุด และในงานวิจัยของ บุษราคัมและคณะ (2560) ได้ศึกษาผลของวัสดุเพาะที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณน้ำตาลในต้นอ่อนข้าวสาลี พบว่าต้นอ่อนข้าวสาลีที่เพาะในวัสดุเพาะปอเทืองและเปลือกเมล็ดกาแฟให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด Tanaka *et al.* (1998) ได้ศึกษาการใช้แสงสีแดงและสีน้ำเงินจากไดโอดเปล่งแสงในการทดลองปลูกกล้วยไม้ พบว่ามีน้ำหนักต้นและน้ำหนักรากมากขึ้น และยังสามารถเพิ่มการสะสมของคลอโรฟิลล์ในพืชมากขึ้น Heo, *et al.* (2006) ได้ศึกษาผลกระทบของไดโอดเปล่งแสง (LED) สีแดงและสีน้ำเงิน เปรียบเทียบกับสีแดงผสมสีน้ำเงินในอัตราส่วน 1:1 พบว่าน้ำหนักสด น้ำหนักแห้งสูงสุดในแสงสีแดงผสมกับสีน้ำเงิน และปริมาณการสะสมของน้ำตาลมากที่สุดในแสงสีแดงผสมสีน้ำเงิน นอกจากแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินแล้วยังได้มีการนำแสงสีขาวมาใช้ในการปลูกกรีนโอ็ค Chen *et al.* (2014) ได้ใช้แสงสีขาวผสมกับสีแดงและสีน้ำเงิน ผลการทดลองพบว่ากรีนโอ๊คมีการเจริญเติบโตที่ดีขึ้น งานวิจัยของ Lin *et al.* (2013) ได้ใช้แสงสีขาวจาก LED ผสมลงไปในแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงิน เปรียบเทียบกับฟลูออเรสเซนซ์ แล้วทดลองกับผักกาดหอม ผลการทดลองพบว่าแสงสีแดงและน้ำเงินที่ผสมกับ LED สีขาวช่วยในเรื่องการเจริญเติบโตได้ดีและช่วยเพิ่มปริมาณน้ำตาล Ma *et al.* (2012) ได้ผสมแสงสีต่างๆ เข้าด้วยกันแล้วนำมาใช้ในการปลูกมันฝรั่ง ผลการทดลองพบว่าแสงผสมระหว่างสีแดง สีน้ำเงินและสีเขียวให้พื้นที่ของใบ ปริมาณคลอโรฟิลด์ ปริมาณการสะสมของน้ำตาลสูงที่สุด Yan Li *et al.* (2017) ได้ศึกษาการใช้แสงจาก LED ในอัตราส่วนแสงสีแดงและสีฟ้าเพื่อศึกษาการสะสมน้ำตาลในต้นมะเขือเทศ พบว่ามะเขือเทศมีการสะสมของน้ำตาลเพิ่มขึ้น

การศึกษาครั้งนี้จึงมีแนวความคิดที่จะนำเทคโนโลยีการปลูกพืชโดยใช้แสงจาก LED มาศึกษาผลกระทบต่อการสะสมของน้ำตาลและการเจริญเติบโตของต้นอ่อนข้าวสาลีโดยใช้แสงจากไดโอดเปล่งแสง โดยมีอัตราส่วนการผสมของแสงสีแดง (Red, R) แสงสีน้ำเงิน (Blue, B) แสงสีเขียว (Green, G) และแสงสีขาว (White, W) ดังนี้ R : B ในอัตราส่วน 1:1, R : B : G ในอัตราส่วน 1:1:1, R : B : W ในอัตราส่วน 1:1:1 และ W อย่างเดียว เพื่อหาสภาวะของแสงที่เหมาะสมซึ่งทำให้ต้นอ่อนข้าวสาลีมีการเจริญเติบโตที่ดีที่สุดและมีปริมาณการสะสมน้ำตาลสูงสุด ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านเกษตรกรรมให้กับเกษตรกร

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมแหล่งกำเนิดแสงจากไดโอดเปล่งแสง

งานวิจัยนี้ ได้ใช้ LED 4 สี คือสีแดง ความยาวคลื่น 660 nm สีน้ำเงิน ความยาวคลื่น 480 nm สีเขียว 525 nm และสีขาว โดย LED แต่ละสีจะมีกำลังไฟฟ้า มุมการส่องสว่าง ความสว่าง ดังแสดงในตารางที่ 1 (Table 1)

Table 1 Characteristics of LEDs used as the light treatments for wheatgrass.

Color	Current (mA)	Forward voltage (V.)	Viewing angle(degree)	wavelength (nm)	Luminous intensity(cd)
Red (R)	20	2.1	30	660	6
Blue (B)	20	4	30	480	12
Green (G)	20	3.7	30	525	9
White (W)	20	3.2	30-50	400-700	6

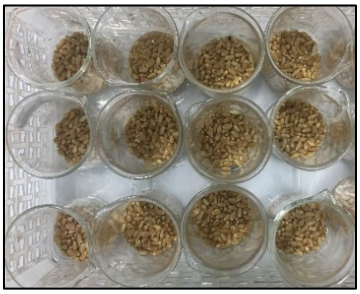
ในการสร้างแหล่งกำเนิดแสงเพื่อให้ได้อัตราส่วนของความเข้มแสงตามที่ต้องการ จะต้องคำนวณจำนวนหลอด LED ที่ต้องใช้ในแต่ละสี โดยจะนำค่าความเข้มแสงของแต่ละสีมาคำนวณ ในงานวิจัยนี้ต้องการใช้แสง 4 อัตราส่วน คือ (1) R:B ในอัตราส่วน 1:1 ใช้ Red LED จำนวน 20 หลอดและ Blue LED จำนวน 10 หลอด (2) R:B:G ในอัตราส่วน 1:1:1 ใช้Red LED จำนวน 12 หลอด Blue LED จำนวน 6 หลอด และ Green LED จำนวน 8 หลอด (3) R:B:W ในอัตราส่วน 1:1:1 Red LED จำนวน 12 หลอด Blue LED จำนวน 6 หลอด และ White LED จำนวน 12 หลอด (4) White LED จำนวน 25 หลอด โดยการควบคุมความเข้มแสง (Photon flux density) ในพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร ให้อยู่ที่ 50 $\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$ ซึ่งใช้ Arduino สร้าง Pulse width modulation ร่วมกับ MOSFET N Chanel ในการวัดความเข้มแสงโดยใช้ Optical Power Meter (Thorlab, PM100) ตัวตรวจวัดห่างจากแหล่งกำเนิดแสงเป็นระยะ 30 เซนติเมตร แล้วทำการวัดความเข้มแสงเฉลี่ยบนพื้นที่ที่กำหนดไว้ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร โดยจะวัดความเข้มแสงทีละความยาวคลื่น ซึ่งความเข้มแสงเฉลี่ยที่ได้จาก LED ทั้ง 4 สีในพื้นที่ขนาด 20 ตารางเซนติเมตรแสดงในตารางที่ 2 (Table 2)

Table 2 Photon flux density of the mixed LED lights in the area of 20 cm^2.

Light ratio	Average Photosynthetic Photon flux density ($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$)				
	Blue 480 nm	Green 525 nm	Red 660 nm	White	Total
RB = 1:1	25.38	0	25.34	0	50.72
RBG = 1:1:1	16.84	17.01	16.82	0	50.67
RBW = 1:1:1	16.53	0	16.87	16.99	50.39
W	0	0	0	50.79	50.79

การเตรียมเมล็ดข้าวสาลีเพื่อเพาะปลูก

ในการศึกษาได้เลือกใช้เมล็ดข้าวสาลีพันธุ์ฝาง 60 การเตรียมเมล็ดจะนำเมล็ดไปล้างน้ำเพื่อทำความสะอาดแล้วแช่น้ำเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (รูปที่ 1 (A)) หลังจากนั้นนำไปบ่มในผ้าเปียกอีก 8 ชั่วโมง (รูปที่ 1 (B)) เพื่อให้เกิดตุ่มรากขนาดเล็ก การเพาะปลูกได้เลือกใช้แกลบดำผสมกับกับขุยมะพร้าวในอัตราส่วน 1:1 ลงในกระถาง (รูปที่ 1 (C)) จัดเตรียมใส่กระถางเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ใส่วัสดุเพาะหนา 2 นิ้ว หลังจากนั้นนำเมล็ดที่ได้ในรูป(B) ไปโรยในกระถางในรูป (C)



(A)

(B)

(C)

(D)

Figure 1 (A) Wheatgrass seeds during soaking in water, (B) soaked seeds in water were wrapped in damp cloth,(C) flowerpots containing black husk and coconut shell's hair, and (D) wheatgrass seeds from B were placed in flowerpots C.

เนื่องจาก LED ที่ใช้มี 4 อัตราส่วน ในการทดลองแต่ละอัตราส่วนจะทำ 3 ซ้ำ ดังนั้นจะต้องเตรียมกระถางทั้งหมด 12 กระถาง โดยในแต่ละกระถางจะมีเมล็ดข้าวสาลี 150 เมล็ด ดังแสดงในรูปที่ 1 (Figure 1)

การทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) โดยมีสิ่งทดลองเป็นต้นข้าวสาลี มีแสงสีต่างๆ 4 อัตราส่วนเป็นทรีทเมนต์ ในแต่ละทรีทเมนต์จะทำซ้ำ 3 ซ้ำๆ ละ 150 ต้น เมื่อวางแผนการทดลองแล้ว จัดเตรียมกระถางและแหล่งกำเนิดแสง LED ของทั้ง 4 ทรีทเมนต์ ในโรงเรือนปิดเพื่อไม่ให้มีผลกระทบจากแสงภายนอก หลังจากที่ทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อให้ต้นข้าวสาลีงอก ซึ่งจะมีความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 (Figure 2) จากนั้นเริ่มให้แสงของ LED ในวันที่ 2 ในแต่ละวันพืชจะได้รับแสงเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ตั้งแต่ 8.00 ถึง 24.00 นาฬิกา ต้นข้าวสาลีจะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีเหลืองกลายเป็นสีเขียวแล้วเริ่มเจริญเติบโตขึ้นในวันถัดๆ ไป จนถึงวันที่ 7 จึงทำการสุ่มวัดต้นอ่อนข้าวสาลีทั้งหมด 100 ต้น ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey’s Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น $p \leq 0.05$

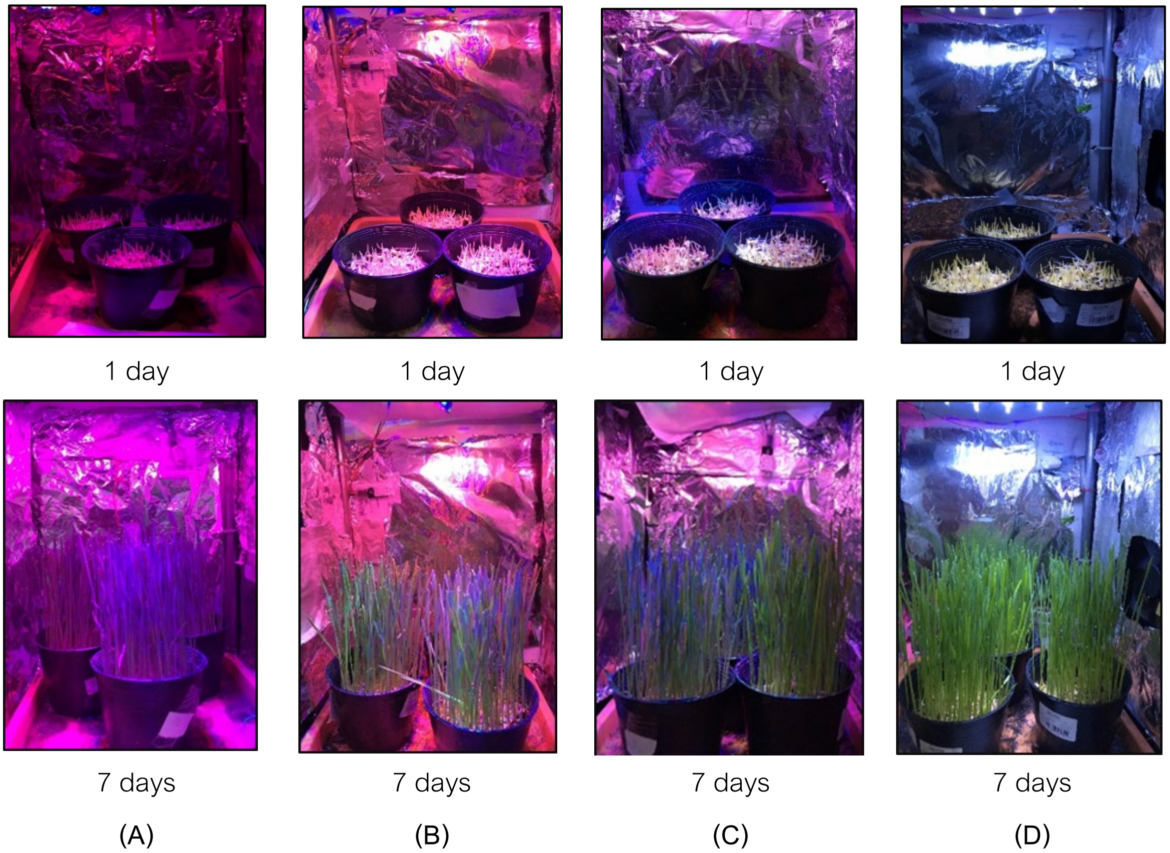


Figure 2 The growth of wheatgrass exposed with four different light treatments: (A) R:B ratio 1:1, (B) R:B:G ratio 1:1:1, (C) R:B:W ratio 1:1:1 and (D) W.

การวัดการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำตาลในต้นอ่อนข้าวสาลี

เมื่อปลูกครบ 7 วัน นำต้นอ่อนข้าวสาลีมาล้างต้นและรากให้สะอาดแล้ว จัดเรียงต้นบนผ้าสีดำเพื่อวัดความยาวต้นและความยาวรากโดยใช้การประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Image J เมื่อวัดความยาวเสร็จแล้วตัดราก และชั่งน้ำหนักต้นและน้ำหนักราก เมื่อชั่งน้ำหนักแล้วนำต้นและรากไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักต้นและรากที่แห้ง

ในการวัดปริมาณน้ำตาล นำสารสกัดจากใบข้าวอย่างละ 10 มิลิลิตร และสารละลายน้ำตาลมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และซูโครส จำนวนตัวอย่างละ 10 มิลิลิตร วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ซึ่งมีสภาวะของเครื่องดังนี้ คอลัมน์: Benso (BP-800 Ca), Mobile Phase: DI, Flow rate 0.4 ml/min, Volume inject 20 ul, Detector : RI และคำนวณปริมาณน้ำตาลในข้าวจาก สูตร วารุณี และคณะ (2546)

$$\text{ความเข้มข้นของน้ำตาล (mg/L)} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของสารตัวอย่าง} \times \text{ความเข้มข้นของน้ำตาลมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟของน้ำตาลมาตรฐาน}}$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของความยาวคลื่นแสงต่อต้นอ่อนข้าวสาลีที่ความเข้มแสง 50 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ เป็นเวลา 7 วัน พบว่าความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของต้นอ่อนข้าวสาลี เนื่องจากความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน ทำให้พืชดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันออกไป ลักษณะภายนอกสามารถสังเกตุเห็นได้ว่าต้นอ่อนข้าวสาลีมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากได้รับแสงที่แตกต่างกัน ดังผลการทดลองที่สรุปได้ดังนี้

(1) ต้นอ่อนข้าวสาลี ที่ปลูกภายใต้แสง RB ให้น้ำหนักต้นสดเฉลี่ยสูงสุดและน้ำหนักต้นแห้งเฉลี่ยสูงสุด คือ 0.1461 กรัมต่อต้น และ 0.1004 กรัมต่อต้น ตามลำดับ

(2) ต้นอ่อนข้าวสาลี ที่ปลูกภายใต้แสง RBW ให้น้ำหนักรากสดเฉลี่ยสูงสุดคือ 0.0135 กรัมต่อต้น

(3) ต้นอ่อนข้าวสาลี ที่ปลูกภายใต้แสง RB ให้ความสูงของต้นสดเฉลี่ยสูงสุดคือ 19.42 เซนติเมตร

(4) ต้นอ่อนข้าวสาลี ที่ปลูกภายใต้แสง RBG ให้ความยาวรากสดเฉลี่ยสูงสุดคือ 14.75 เซนติเมตร

ต้นอ่อนข้าวสีที่ปลูกใน RB ให้ปริมาณน้ำหนักสดและความสูงยาวต้นสูงสุดสอดคล้องกับงานวิจัยของ Heo, *et al.* (2006) ผลการวัดน้ำหนักของรากแห้ง พบว่าต้นอ่อนข้าวสาลีที่ปลูกภายใต้แสง W ให้ปริมาณน้ำหนักเฉลี่ยน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำหนักในทรีทเมนต์อื่น และภายใต้แสง RBG ต้นอ่อนข้าวสาลีจะมีความยาวรากเฉลี่ยมากที่สุดคือ 14.75 เซนติเมตร

Table 3 Growth characteristics of wheatgrass under 4 different light treatments.

Light treatment	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		Height (cm)	
	Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Root
RB	0.1464±0.003[a]	0.0125±0.011[ab]	0.1004±0.0848[a]	0.0094±0.0001[a]	19.42±0.45[a]	9.21±0.23[c]
RBG	0.1203±0.014[bc]	0.0119±0.003[bc]	0.0989±0.0697[a]	0.0093±0.0006[a]	17.72±0.99[ab]	14.75±0.4[a]
RBW	0.1357±0.006[ab]	0.0135±0.007[a]	0.1003±0.0363[a]	0.0096±0.0004[a]	18.12±0.69[ab]	11.28±0.14[b]
W	0.1120±0.002[cd]	0.0123±0.005[abc]	0.0891±0.0436[ab]	0.0099±0.0003[a]	17.37±0.34[bc]	11.17±0.25[b]

Means that do not share a letter are significantly different at $p \leq 0.05$ by Tukey's Multiple Range Test, n = 3.

ผลการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลในต้นอ่อนข้าวสาลีด้วยเครื่อง HPLC ปรากฏว่าตรวจพบเฉพาะน้ำตาลฟรุกโตส ดังแสดงในรูปที่ 3 (Fugire 3) ซึ่งจะเห็นว่าน้ำตาลฟรุกโทสในต้นอ่อนข้าวสาลีสดที่ปลูกภายใต้แสง RBG มีปริมาณ

ฟรุกโตสเฉลี่ยสูงสุดคือ 8.2912 มิลิกรัมต่อลิตร สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma *et al.* (2012) ซึ่งมากกว่าในต้นที่ปลูกภายใต้แสงสีอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ

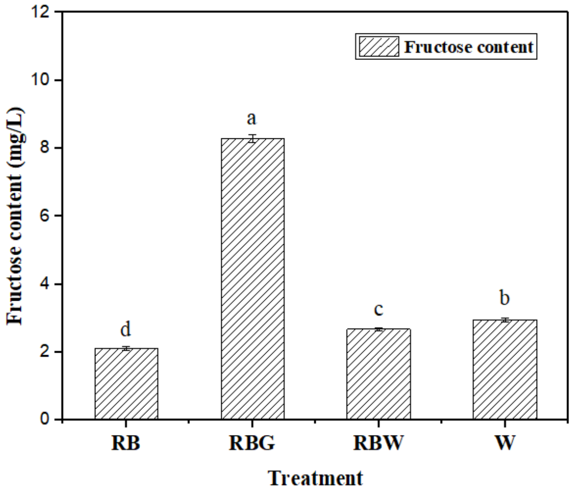


Figure 3 Fructose content in wheatgrass planted under 4 light treatments. Data presented as mean ± SE and means that do not share a letter are significantly different at p≤0.05 by Tukey's Multiple Range Test, n = 3.

สรุป

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้แสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน มีผลต่อการเจริญเติบโตและการสะสมของน้ำตาลในต้นอ่อนข้าวสาลี การปลูกต้นอ่อนข้าวสาลีภายใต้แสงสีแดงต่อแสงสีเขียวที่อัตราส่วน 1:1 จะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูงสุดในด้านน้ำหนักของต้นอ่อนข้าวสาลีสด ส่วนต้นอ่อนข้าวสาลีที่ปลูกภายใต้แสงสีแดงต่อสีน้ำเงินต่อสีเขียวที่อัตราส่วน 1:1:1 ให้ปริมาณน้ำตาลฟรุกโตสสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถนำ LED ไปประยุกต์ใช้ในการปลูกข้าวสาลี เพื่อให้ได้ต้นอ่อนข้าวสาลีที่มีน้ำหนักมากและให้ปริมาณน้ำตาลสูงยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอบคุณ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับคำแนะนำต่างๆในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

บุษราคัม จีนปึ้ง และ ชมดาว ข้าจริง. 2560 **ผลของวัสดุเพาะที่มีต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำตาลของต้นอ่อนข้าวสาลี**. การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏเพชรบุรีวิจัยศิลปวัฒนธรรม ครั้งที่ 4.

วารุณี ภู่สัจจพงษ์, อรพิน เกิดชูชื่น และ สิรินทรเทพ เต้าประยูร. 2546. น้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ในรากและสารหลั่งรากของข้าวสุพรรณบุรี 1. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.** 26(3): 339-350.

สาธิต ปิ่นมณี. ศิลาวัน จักรบุตร. กาญจนา พิบูลย์. 2555. **การพัฒนาวัสดุเพาะและการใช้ประโยชน์จากกากต้นอ่อนข้าวสาลี.** สัมนาวิชาการกลุ่มศูนย์วิจัยข้าวภาคเหนือตอนบนแลภาคเหนือตอนล่าง 13-20.

Chen, X.L., W.Z. Guo, X.Z. Xue, L.C. Wang and X.J. Qiao. 2014. Growth and quality responses of ‘Green Oak Leaf’ lettuce as affectedby mono-chromic or mixed radiation provided by fluorescent lamp (FL) and light-emitting diode (LED). **Scientia Horticulturae** 172: 168-175.

Heo, J.W, K.S. Shin, S.K. Kim and K.Y. Paek. 2006. Light quality affects in vitro growth of grape ‘Teleki 5BB7’. **Journal of Plant Biology** 49: 276-280.

Kuan, H.L., M.Y. Huangb, W.D. Huang, M.H. Hsu and Z.W. Yang and C.M. Yang. 2013. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (Lactuca sativaL. var. capitata). **Scientia Horticulturae** 150: 86-91.

Ma, X., Y. Wang, M. Liu, J. Xu and Z. Xu. 2015a. Effects of green and red lights on the growth and morphogenesisof potato (Solanumtuberosum L.) plantlets in vitro. **Scientia Horticulturae** 190: 104-109.

Ma, G., L. Zhang, M. Kato, K. Yamawaki, Y. Kiriiwa, M. Yahata, Y. Ikoma and H. Matsumoto. 2015b. Effect of the combination of ethylene and red LED light irradiation on carotenoid accumulation and carotenogenic gene expression in the flavedo of citrus fruit. **Postharvest Biology and Technology** 99: 99-104.

Tanaka, M., T. Takamura, H. Watanabe, M. Endo, T. Yanagi and K. Okamoto. 1998. *In vitro* growth of Cymbidium plantlets cultured under super bright and blue light emitting diodes (LEDs). **Journal of Horticultural Science** 73: 39-44.

Yan, L., X. Guofeng, W. Min, S. Qinghua, Y. Fengjuan, and W. Xiufeng. 2017. Carbohydrate accumulation and sucrose metabolism responses in tomato seedling leaves when subjected to different light qualities. **Scientia Horticulturae** 255: 490-497.

Evaluation of Acetylcholinesterase Inhibition Activity of *Picrasma javanica* Bl. Extract and Its Antimalarial Compound, 1-Ethyl-β-carboline

Kamma Rabgay[1], Juggreewut Junwised[1], Kanyarat Sompu[1], Wilasinee Kuangaw[1], Prapapan Temkitthawon[1*] and Chalerm Saiin[1*]

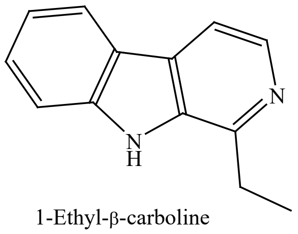
ABSTRACT

Malaria is caused by the *Plasmodium* protozoa, which are transmitted by female mosquitoes of the genus *Anopheles*. Four species of parasites, including *P. falciparum*, *P. ovale*, *P. vivax*, and *P. malaliae*, are responsible for the disease in human beings. From this view, the antimalarial agents have to kill *Plasmodium* protozoa without effects to the human body. To get more information of pharmacological activities of Thai *Picrasma javanica* Bl., this research attempted to evaluate acetylcholinesterase inhibitory activity of chloroform crude extract of stem bark and its antimalarial compound 1-ethyl-β-carboline. They were evaluated *in vitro* for their inhibition potency towards acetylcholinesterase by the modified Ellman's method. The results showed that 1-ethyl-β-carboline had low acetylcholinesterase inhibition (48.56±0.72%) which was related to less AChE inhibition of chloroform crude extract (< 10%). While the electron rich and large molecule such as tiliacorinine, isolated from *Tiliacorine triandra* roots, had higher acetylcholinesterase inhibition activity (73.93±0.68%). Further investigates of various activities of *P. javanica* extract and its pure compounds will improve the safety of using *P. javanica* for cure malaria disease among Karen in Asia.

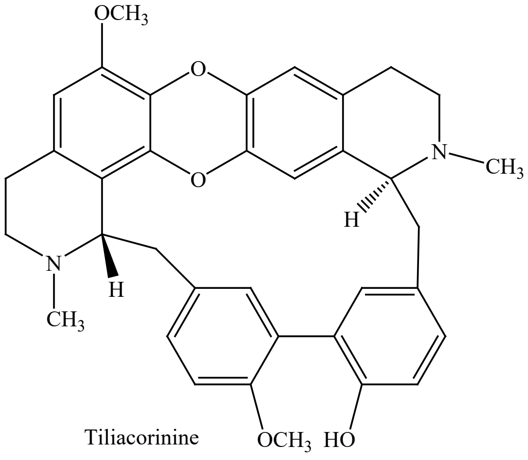
Key words: 1-ethyl-β-carboline, *Picrasma javanica* Bl., acetylcholinesterase inhibition activity

* Corresponding author; e-mail address: Chalerms@nu.ac.th, prapapantem@gmail.com

[1]Department of Pharmaceutical Chemistry and Pharmacognosy, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Naresuan University, Phitsanulok 65000



1-Ethyl-β-carboline

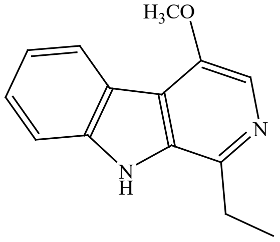


Tiliacorinine

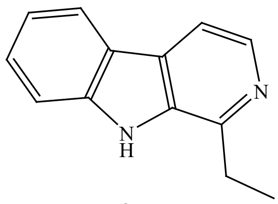
INTRODUCTION

The bark of *Picrasma javanica* Bl. has been used for malaria disease treatment in the traditional medicine in Myanmar, Indonesia and Thailand (Old Style Doctor Association, 1962). In 1942, during the 2nd World War, 36 recipes of Thai Folk Medicine included *P. javanica* were used for treatment soldiers who infected either *Plasmodium faciparum* or *P. vivax* (Ketusinh, 1948). In addition, Tangjitman *et al.* (2013) determined traditional medicinal knowledge in 14 Karen villages and culturally important medicinal plant in each Karen villages in northern Thailand. It was found that 379 medicinal plant species were used. Importantly, *P. javanica* showed cultural important index (CI) of 0.96.

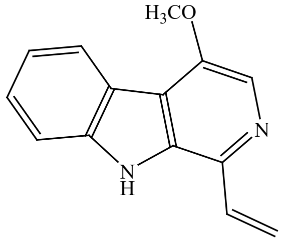
Thai *P. javanica* was tested for antimalarial activities. Pavanand *et al*. (1988) reported that chloroform extract of the bark possessed the high level of *in vitro* antimalarial activity against *P. falciparum* asexual stage. Further isolation and purification of the chloroform extract resulted in the identification of two pure alkaloids 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline and 6-hydroxy-4-methoxy-1-vinyl-β-carboline. Also, Saiin *et al*. (2016) reported the results of isolation and *in vitro* antimalarial activity against *P. falciparum* K1 of chloroform extract from Thai *P. javanica* stem bark. The results showed that 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline (Figure 1) and its derivative, 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline, play a role for antimalarial activity of *P. javanica*. Recently study showed that lack of 4-methoxy moiety of 1-ethyl-β-carboline increased both antimalarial activity and selective toxicity (Junwised *et al*., 2019).



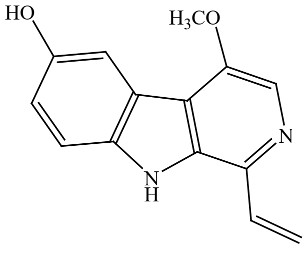
1-Ethyl-4-methoxy-β-carboline



1-Ethyl-β-carboline



4-Methoxy-1-vinyl-β-carboline



6-Hydroxy-4-methoxy-1-vinyl-β-carboline

Figure 1 Chemical structure of four β-carbolines found in Thai *P. javanica*.

In addition, Indonesia *P. javanica* extracts were tested for antimalarial against rodent plasmodium, *Plasmodium berghei* in single dose. The results showed that stem bark and leave extracts could decrease parasitemia (Praptiwi *et al*., 2007). Therefore, it is valuable to study the chemical constituents, pharmacological activities and toxicities of *P. javanica*. These scientific knowledge shall be supported the use and safety of *P. javanica* as antimalarial drug among the Karen in Asia.

Malaria is caused by the *Plasmodium* protozoa, which are transmitted by female mosquitoes of the genus *Anopheles*. Four species of parasites, including *P. falciparum*, *P. ovale*, *P. vivax*, and *P. malaliae*, are responsible for the disease in human beings (Takasu, 2016). From this view, the antimalarial agents have to kill *Plasmodium* protozoa without effects to the human body. In order to get more information of pharmacological activities of this medicinal plant, this research attempted to evaluate acetylcholinesterase inhibition activity of chloroform crude extract of Thai *P. javanica* stem bark and its antimalarial compound, 1-ethyl-β-carboline.

MATERIALS AND METHODS

Tested samples

1. Chloroform crude extract of the stem bark of *P. javanica*

The stem bark of *P. javanica* (collected from Queen Sirikit Botanic Garden, Chiang Mai) was macerated with hexane and kept at room temperature. About 100 g of dried ground hexane extracted *P. javanica* stem bark was macerated in 500 ml chloroform for three days. Then it was filtered and evaporated to dryness under reduced pressure. The residue plant material was extracted again using

the same process. The second extract was pooled together with the first extract. Yield was 4.39% (Saiin *et al*., 2019).

2. 1-Ethyl-β-carboline

1-Ethyl-β-carboline was synthesized by follow the methods reported by Bamgbose *et al*. (1977) and Ohmoto *et al.* (1987). The reaction of tryptophan with propionaldehyde in water provided 3-carboxylic-1,2,4-trihydrocarboline. The second reaction was follow by oxidation with potassium dichromate (Junwised *et al*., 2019).

3. 1-Ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline

1-Ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline was synthesized by the reaction of tryptamine with propionaldehyde in water (Saiin *et al*., 2018).

4. Tiliacorinine

Tiliacorinine was isolated from the roots of *Tiliacora triandra* Diels (Saiin and markmee, 2003).

Acetylcholinesterase inhibitory activity test

1. Chemicals and instrument

Acetylthiocholine iodide, electric eel's acetylcholinesterase (AChE, type VI-S), 5,5′-dithiobis[2-nitrobenzoic acid], and bovine serum albumin were purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis., MO, USA). The organic solvents and other reagents were obtained from RCI Labscan (Bangkok, Thailand).

Acetylcholinesterase inhibitory activity inhibitory activity was measured using a BioStackmicroplate stacker (BioTek Instruments, Inc., headquartered in Winooski, VT, USA).

2. Cholinesterase inhibition assays

Acetylcholinesterase inhibitory activity was measured by mean of spectrophotometric method previously developed (Ellman *et al*., 1961; Ingkaninan *et al*., 2003). Briefly, 25 μl of 1.5 mM acetylthiocholine iodide, 50 μl of 50 mMTris–HCl buffer (pH 8.0), 125 μl of 3 mM 5,5′-dithiobis[2-nitrobenzoic acid], and 25 μl of sample dissolved in buffer containing methanol not more than 10% were added to the wells followed by 25 μl of 0.51 U/ml acetylcholinesterase. The reaction was read at 405 nm every 17 seconds for 2 minutes using a micro-plate reader. The experiments were done in triplicate. Enzyme activity was calculated as a percentage of the velocities of sample compared to negative control. The inhibitory activity was calculated from 100 percentage subtracted by the percentage of enzyme activity. Positive control was galantamine.

RESULTS AND DISCUSSION

1-Ethyl-β-carboline and chloroform crude extract were evaluated *in vitro* for their inhibition potency towards AChE by the modified Ellman’s method, using galantamine (100 μM, 28.74 μg/ml) as a positive control. The activities of 1-ethyl-β-carboline and chloroform crude extract were screened at

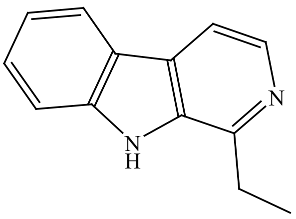
100 μM and 100 μg/ml respectively using AChE (from electric eel). The % inhibition values was shown in Table 1, 1-ethyl-β-carboline and chloroform crude extract showed 48.56±0.72 and <10% AChE inhibition, respectively.

Table 1 The percentage for acetylcholinesterase inhibitory activity of chloroform crude extract of *P. javanica* stem bark and 1-ethyl-β-carboline.

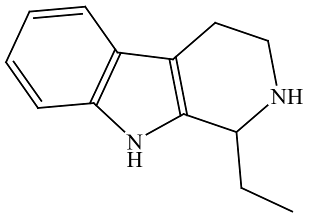
Sample	% Inhibition
Chloroform crude extract of *P. javanica* stem bark	<10%
1-ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline	<10%
1-ethyl-β-carboline	48.56±0.72
Tiliacorinine	73.93±0.68
Galanthamine	98.44±0.59

1-Ethyl-β-carboline showed low AChE inhibition which was related to less AChE inhibition of chloroform crude extract. It indicated that using the stem bark of *P. javanica* for malaria treatment in Karen of the northern of Thailand could be safety. At least, there was very low effect to human body that involved enzyme acetylcholinesterase. However, Otmoto *et al*. (1987) successively extracted the air dried bark of *P. javanica* growing in Indonesia with *n*-hexane, chloroform, and then methanol. The chloroform extract provided 1-ethyl-β-carboline, crenatine, picrasidine I, crenatidine and canthin-6-one. The methanol extract provided picrasidine-I, picrasidine J, and crude picrasidine T. Thus, these indole alkaloids of *P. javanica* should be tested for AChE inhibition.

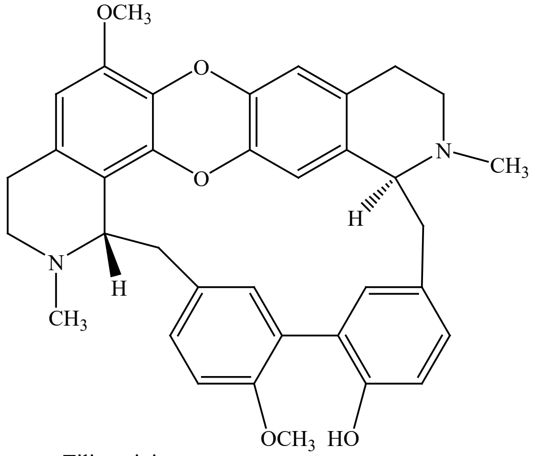
In addition, the non-aromatic derivative of 1-ethyl-β-carboline, 1-ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (Figure 2) showed very low AChE inhibition. While the electron rich and large molecule such as tiliacorinine, isolated from *T. triandra* roots, showed higher AChE inhibition. Fourteen indole alkaloids isolated from *P. javanica* were reported (Saiin and Sirithunyalug, 2017). Thus, it was interesting to study structure activity relationship of these alkaloids.



1-Ethyl-β-carboline



1-Ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline



Tiliacorinine

Figure 2 Chemical structure of three compounds tested for acetylcholinesterase inhibitory activity; 1-ethyl-β-carboline, 1-ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline and Tiliacorinine.

Recently investigation by Nutmakul *et al* (2016) found that tiliacorinine (Figure 2) isolated from the stems of *T. triandra* had very good antiplasmodial activity against *Plasmodium falciparum* chloroquine resistant stain (PfW2) with IC_{50} of 2.14 µg/ml, but poor selective toxicity with selective index of 0.98 (cytotoxicity on peripheral blood mononuclear cells). In addition, our results showed that tiliacorinine had AChE inhibition activity higher than that of 1-ethyl-β-carboline. Thus, it had to aware the side effect resulted from AChE inhibition activity and cytotoxic effects of tiliacorinine.

Interesting, Saiin *et al*. (2019) determined the chemical components of Thai *P. javanica* growing in Chiang Mai province by using thin layer chromatography (TLC) and high resolution mass spectrometry (MS). It demonstrated that there were at least six β-carbolines in stem bark of this plant; composed of 1-ethyl-β-carboline, 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline (crenatine), 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline (dehydrocrenatine), 5- or 6- or 8-hydroxy-dehydrocrenatine, 5- or 8-hydroxy-crenatine, picrassidine G and picrassidine T. At present, three β-carbolines found in Thai *P javanica*; 1-ethyl-β-carboline, crenatine and dehydrocrenatine were synthesized and evaluated as new potential antimalarial agents based on π-delocalized lipophilic cation hypothesis (Takasu *et al.*, 2004 & 2005; Junwised *et al.*, 2019). The results, showed in Table 2, demonstrated that lack of 4-methoxy moiety of 1-ethyl-β-carboline increased both antimalarial activity and selective toxicity.

Table 2 *In vitro* antimalarial activity and cytotoxicity of synthetic β-carbolines.

Compound	EC_{50} (M)		Selective toxicity [c]
	P. falciparum [a]	FM3A [b]	
1-ethyl-β-carboline	$1.2x10^{-6}$	$>3.1x10^{-5d}$	>25
1-ethyl-4-methoxy-β-carboline	$1.6x10^{-5}$	$1.8x10^{-5}$	1.1
4-methoxy-1-vinyl-β-carboline	$5.0x10^{-6}$	$3.8x10^{-6}$	0.8
Quinine	$1.1x10^{-7}$	$1.1x10^{-4}$	910

[a]Chloroquine sensitive strain (FCR-3). [b]Mouse mammary tumor FM3A cells representing a model of host. [c]Selective toxicity = EC_{50} for (FM3A) /EC_{50} for (*P. falciparum*). [d]EC_{20} value (80% growth of FM3A cells was observed). (Takasu *et al.*, 2004 & 2005; Junwised *et al.*, 2019)

CONCLUSIONS

P. javanica extract and its antimalarial compound 1-ethyl-β-carboline had poor AChE inhibition activity. Further investigation of various activities of its extracts and pure compounds will improve the safety of using this medicinal plant for cure malaria disease among Karen in Asia. Especially, structure activity relationship study of fourteen indole alkaloids could be confirmed the safety of this plant.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was financial supported by Faculty of Pharmaceutical Sciences, Naresuan University. We thank Associate Professor Kornkanok Ingkaninan for laboratory facilities. Also, we thank the members of Department of Pharmaceutical Chemistry and Pharmacognosy for their opinions.

REFERENCES

Bamgbose, S.O.A., K.L. Dramane and J.I. Okogun. 1977. Synthesis and preliminary pharmacological studies of 1-ethyl-β-carboline. **Planta Medica** 31: 193-200.

Ellman, G.L., D.K. Lourtney, V. Andres and G. Gmelin. 1961. A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. **Biochemical Pharmacology** 7: 88-95.

Ingkaninan, K., P. Temkitthawon, K. Chuenchom, T. Yuyaem and W. Thongnoi. 2003. Screening for acetylcholinesterase inhibitory activity in plants used in Thai traditional rejuvenating and neurotonic remedies. **Journal of Ethnopharmacology** 89: 261-264.

Junwised, J., C. Saiin, K. Takasu and M. Ihara. 2019. Synthesis, Cytotoxicity and *in vitro* antimalarial activity of 1-ethyl-β-carboline; an indole alkaloid of *Picrasma javanica* Bl. **Proceeding of the 57th Kasetsart University Annual Conference; Glocalization for digitized Thailand.** Bangkok; Kasetsart University. 35-42.

Ketusinh, O.1948. Report on clinical antimalarial therapy of Thai medicinal plants. **Proceeding of the Siriraj 60th Aniversary Meeting** 275-281.

Nutmakul, T., K. Pattanapanyasat, N. Soonthornchareonnon, K. Shiomi, M. Mori and S. Prathanturarug. 2016. Antiplasmodial activities of a Thai traditional antipyretic formulation, Bencha-Loga-Wichian: A comparative study between the root and substitutes, the stems. **Journal of Ethnopharmacology** 193: 125-132.

Old style Doctor Association. 1962. **Pra-muan-sappa-kun-ya-thai. Part I.** Bangkok: Amphon-pittaya. 107.

Ohmoto, T., K. Koike and K. Mitssunaga.1987. Alkaloids from *Picrasma javanica* growing in Indonesia. **Shoyakugaku Zasshi** 41 (4): 338-340.

Pavanand, K., K. Yongvanitchit, H.K. Webster, T. Dechatiwongse, W. Nutakul, Y. Jewvachdamrongkul and J. Bansiddhi. 1988. *In vitro* antimalarial activity of a Thai medicinal plant *Picrasma javanica* Bl. **Phytother. Res.** 2: 33-36.

Praptiwi, M. and H. Chairul. 2007. Antimalaria *in vivo* activity test of kipahit extract (*Picrasma javanica*) to mice infected with *Plasmodium berghei*. **Biodiversitas** 8 (2): 111-113.

Saiin, C. and B. Sirithunyalug. 2017. Review of the chemical structures and antimalarial activities of indole alkaloids isolated from *Picrasma javanica* Bl stembark. **Adv. Med. Plant. Res.** 5 (2): 29-36.

Saiin, C. and S. Markmee. 2003. Isolation of antimalarial active compound from Yanang (*Tiliacora triandra* Diels). **The Kasetsart Journal Natural Sciences** 37 (1): 47-51.

Saiin, C., B. Sirithunyalug, A. Baramee, K. Takasu and M. Ihara. 2018. The Convenient method for synthesis of crenatine; an antimalarial agent of *Picrasma spp.* **Proceeding of the 56th Kasetsart University Annual Conference; Agriculture Science Toward Creative Economy.** Bangkok; Kasetsart University. 152-159.

Saiin, C., B. Sirithunyalug, R. Rattanajak, S. Kamchonwongpaisan, K. Ingkaninan, A. Baramee and K. Sukontason. 2016. Isolation and *in vitro* antimalarial activity of chloroform extract from Thai *Picrasma javanica* Bl. stembark. **Adv. Med. Plant. Res.** 4 (3): 94-98.

Saiin, C., J. Junwised, N. Nuengchamnong and K. Ingkaninan. 2019. Determination of β-carbolines in Thai *Picrasma javanica* Bl.; the source of potential antimalarial agents. **Adv. Med. Plant. Res.** 7 (2): 61-67.

Saiin, C., R. Rattanajak, S. Kamchonwongpaisan, K. Ingkaninan, K. Sukontason, A. Baramee and B. Sirithunyalug. 1977. Isolation and *in vitro* antimalarial activity of hexane extract from Thai *Picrasma javanica* Bl. stembark. **Southeast Asian J Trop Med Public Health** 34 (Supp 2): 51-55.

Takasu, K. 2016. π–Delocalized lipophilic cations as new candidates for antimalarial, antitrypanosomal and antileishmanial agents: synthesis, evaluation of antiprotozoal potency, and insight into their action mechanisms. **Chem. Pharm. Bull.** 64: 656-667.

Takasu, K., T. Shimogama, C. Saiin, H.S. Kim, Y. Wataya and M. Ihara. 2004. π–Delocalized β–carbolinium cations as potential antimalarials. **Bioorg. Med. Chem. Lett.** 14: 1689-1692.

Takasu, K., T. Shimogama, C. Saiin, H.S. Kim, Y. Wataya, R. Brun and M. Ihara. 2005. Synthesis and evaluation of beta-carbolinium cations as new antimalarial agents based on π-delocalized lipophilic cation (DLC) hypothesis. **Chem. Pharm. Bull. (Tokyo).** 53 (6): 653-661.

Tangjitman, K., C. Wongsawad, P. Winijchaiyanan, T. Sukkho, K. Kamwong, W. Pongamornkul and C. Trisonthi. 2013. Traditional knowledge on medicinal plant of the Karen in northern Thailand: a comparative study. **Journal of Ethnopharmacology** 150 (1): 232-243.

ผลของ 2, 4-D ต่อการชักนำให้เกิดแคลลัสในข้าวพันธุ์ กข43

Effect of 2, 4-D on Callus Induction of Rice (*Oryza sativa* L.) cv. RD43

ปุณดานัย ชิตเพชร[1], ณรงค์ วงศ์กันทรากร[1*] และ ณัฏฐา เสนีวาส[1]

Pundanai Chitphet[1], Narong Wongkantrakorn[*] and Nuttha Sanevas[1]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อศึกษาวิธีการฟอกฆ่าเชื้อเมล็ดข้าวและผลของ 2, 4- dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อการชักนำให้เกิดแคลลัสของข้าวพันธุ์ กข43 จากการฟอกฆ่าเชื้อเมล็ดข้าวพันธุ์ กข43 ด้วยสารละลาย Clorox® 15% (sodium hypochlorite 6%) พบว่าให้ผลการปลอดเชื้อ 98% และมีการงอกของเมล็ดที่ 98% จากการเพาะเลี้ยงเมล็ดข้าวบนอาหาร Murashige and Skoog medium (MS) ที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25±2°C เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าอาหารทุกสูตรที่เติม 2, 4-D สามารถชักนำให้เกิดแคลลัสได้ แต่ในอาหารชุดควบคุมไม่มีแคลลัสเกิดขึ้น น้ำหนักสดและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลลัสมีการเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ 2, 4-D ทั้งนี้สูตรอาหาร MS ที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เหมาะสมต่อการชักนำให้เกิดแคลลัสมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสด 39.58 มิลลิกรัม และค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลลัส 0.73 เซนติเมตร ในขณะที่สูตรอาหาร MS ที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลลัสมีการลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม 2, 4-D ความเข้มข้นสูงมีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแคลลัส

ABSTRACT

This work aimed to study explant sterilization methods and effects of different concentrations of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) on the callus induction of rice cv. RD43. The mature grains of rice cv. RD43, dehusked and sterilized using 15% Clorox® (6% sodium hypochlorite), gave 98% contaminant-free and 98% seed germination. Sterilized grains were cultured on Murashige and Skoog medium (MS) supplemented with 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 and 5.0 mg L^{-1} of 2, 4-D at 25±2°C for 4 weeks and showed that calli were generated on MS medium supplemented with all tested concentrations different concentrations of 2, 4-D. No callus was generated from the MS hormone-free medium. The fresh weight and average tissue diameter of calli increased with elevated concentrations of 2, 4-D. The MS medium with 4.0 mg L^{-1} 2, 4-D gave the highest fresh weight (39.58 mg) and average tissue diameter (0.73 cm) of calli. However, MS medium with 5.0 mg L^{-1} 2, 4-D gave reduced fresh weights and average tissue diameters of calli, indicating that high concentrations of 2, 4-D could inhibit callus development.

Key words: callus induction, rice cv. RD43, 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid

* Corresponding author; e-mail address: fscinrw@ku.ac.th

[1]ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Botany, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากเป็นทั้งอาหารหลักและสินค้าส่งออกหลักของประเทศ ประเทศไทยมีข้าวพันธุ์ปลูกหลากหลายพันธุ์ โดยเฉพาะข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 เป็นข้าวที่ได้รับการรับรองพันธุ์จากกรมการข้าวของประเทศไทย เพื่อเป็นพันธุ์ข้าวแนะนำให้เกษตรกรปลูก และเป็นพันธุ์ข้าวที่มีค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI) ในระดับปานกลางค่อนข้างต่ำ จึงเป็นอาหารทางเลือกเพื่อสุขภาพสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานและโรคไต ซึ่งมีความจำเป็นต้องควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด และมีข้อจำกัดในการบริโภคอาหารที่มีควรมีปริมาณน้ำตาลค่อนข้างน้อย (อังศุธรย์ และคณะ, 2560)

ปัจจุบันกระแสนิยมบริโภคข้าวเพื่อสุขภาพของผู้บริโภคได้รับความนิยมมากขึ้นทั้งในประเทศและต่างประเทศ แต่ด้วยการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศทำให้ข้าวพันธุ์ กข43 มีผลผลิตลดลงและมีไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด การเพิ่มผลผลิตให้กับข้าวสามารถทำได้โดยการปรับปรุงพันธุ์และการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเป็นเทคนิคที่มีความสำคัญต่อการศึกษาทางด้านพื้นฐานและประยุกต์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงพันธุ์ อย่างไรก็ตามการศึกษาขั้นพื้นฐานทางด้านการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของข้าวพันธุ์ กข43 เช่น การฟอกฆ่าเชื้อและการชักนำให้เกิดแคลลัสของข้าวพันธุ์ กข43 ยังไม่พบการรายงาน ซึ่งในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อข้าวสามารถฟอกฆ่าเชื้อเมล็ดของข้าวที่แกะเปลือกออกแล้วด้วยสารละลาย Clorox® ได้ (สมดังใจ และคณะ, 2554; ยงศักดิ์ และ อัญชลี, 2558) และการชักนำให้เกิดแคลลัสของข้าว สามารถใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตกลุ่มออกซิน (auxin) ชนิด 2, 4-D เพียงชนิดเดียวหรือร่วมกับสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดอื่นได้ (Katiyar *et al*., 1999; Karthikeyan *et al*., 2009; Upadhyaya *et al*., 2015)

ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงได้ศึกษาวิธีการฟอกฆ่าเชื้อชิ้นส่วนพืชและผลของ 2, 4-D ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่มีผลต่อการชักนำให้เกิดแคลลัสของข้าวพันธุ์ กข43 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการชักนำให้เกิดแคลลัส และนำผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการคัดเลือกให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นเพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภคต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการฟอกฆ่าเชื้อชิ้นส่วนพืช

นำเมล็ดข้าวพันธุ์ กข43 ที่แกะเปลือกออก มาฟอกฆ่าเชื้อด้วยวิธีการต่างกัน 4 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 แช่เมล็ดข้าวแกะเปลือกในสารละลาย Clorox® 5% เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วฟอกฆ่าเชื้อด้วยสารละลาย Clorox® 15% เป็นเวลา 30 นาที

วิธีที่ 2 แช่เมล็ดข้าวแกะเปลือกในสารละลาย Clorox® 5% เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วฟอกฆ่าเชื้อด้วยสารละลาย Clorox® 30% เป็นเวลา 30 นาที

วิธีที่ 3 ฟอกฆ่าเชื้อเมล็ดข้าวแกะเปลือกด้วยสารละลาย Clorox® 15% เป็นเวลา 30 นาที

วิธีที่ 4 ฟอกฆ่าเชื้อเมล็ดข้าวแกะเปลือกด้วยสารละลาย Clorox® 30% เป็นเวลา 30 นาที

ทุกวิธีเติมสารลดแรงตึงผิว Tween-20 ประมาณ 2-3 หยด ฟอกฆ่าเชื้อด้วยเครื่องเขย่า 120 รอบต่อนาที (revolutions per minute, rpm) และล้างด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้ว 3 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที

จากนั้นนำเมล็ดข้าวที่ผ่านการฟอกฆ่าเชื้อแล้ว มาเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ในจานเพาะเลี้ยงสูตรละ 10 จาน จานละ 10 เมล็ด วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design,

CRD) เพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ เพื่อศึกษาการปลอดเชื้อและการงอกของเมล็ดข้าว

การชักนำให้เกิดแคลลัส (callus induction)

นำเมล็ดข้าวพันธุ์ กข43 ที่ผ่านการฟอกฆ่าเชื้อด้วยวิธีที่เหมาะสมจากการทดลองแรก มาเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้นต่าง ๆ ดังนี้

สูตรอาหารที่ 1 MS ไม่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโต (ชุดควบคุม)

สูตรอาหารที่ 2 MS เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

สูตรอาหารที่ 3 MS เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

สูตรอาหารที่ 4 MS เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

สูตรอาหารที่ 5 MS เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

สูตรอาหารที่ 6 MS เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) สูตรละ 15 ขวด ขวดละ 1 เมล็ด เพาะเลี้ยงเมล็ดข้าวในห้องเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชที่ อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

การบันทึกผลและวิเคราะห์ข้อมูล (data collection and analysis)

บันทึกผลของ 2, 4-D ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อการชักนำให้เกิดแคลลัสของข้าวพันธ์ กข43 โดยเก็บบันทึกข้อมูลการชักนำให้เกิดแคลลัส ดังนี้ การชักนำให้เกิดแคลลัส (Callus Induction Frequency, CIF), ชนิดของแคลลัส (callus type), สีของแคลลัส (color of callus), น้ำหนักสดของแคลลัส (fresh weight of callus), ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลลัส (Average Tissue Diameter, ATD) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การชักนำให้เกิดแคลลัส โดยการนับจำนวนเมล็ดข้าวที่เกิดแคลลัส แล้วนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{การเกิดแคลลัส (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{จำนวนชิ้นส่วนพืชที่มีการเกิดแคลลัส}}{\text{จำนวนชิ้นส่วนพืชทั้งหมดที่เพาะเลี้ยง}} \times 100\%$$

(Tariq, 2008; Upadhyaya *et al.*, 2015)

2. ชนิดของแคลลัส จำแนกโดยลักษณะและพื้นผิวของแคลลัส แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

    3.2.1 compact callus มีลักษณะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนหนาแน่น

    3.2.2 friable callus มีลักษณะเกาะกลุ่มกันหลวม ๆ สามารถแยกออกจากกันง่าย

    3.2.3 mixed callus มีทั้ง compact callus และ friable callus อยู่ร่วมกัน

3. สีของแคลลัส จำแนกโดยบริเวณพื้นที่ที่เป็นสีต่าง ๆ ของแคลลัส

4. น้ำหนักสด ชั่งน้ำหนักสดของแคลลัส และนำมาหาค่าเฉลี่ย

5. ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางแคลลัส หาได้จากการวัดขนาดของแคลลัสด้านที่ยาวที่สุดและด้านที่กว้างที่สุดที่ตั้งฉากกับด้านที่ยาวที่สุด และนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$ATD = \frac{L + W}{2}$$

ATD = ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางแคลลัส (Average Tissue Diameter)

L = ความยาวของด้านที่ยาวที่สุดของแคลลัส

W = ความยาวของด้านที่กว้างที่สุดซึ่งตั้งฉากกับด้านยาวของแคลลัส

(Taylor *et al.*, 1992)

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม RStudio software (version 1.2.1335) “agricolae” package ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) โดยเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยวิธี Duncan’s multiple range test (DMRT)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิธีการฟอกฆ่าเชื้อชิ้นส่วนพืช

จากการศึกษาวิธีการฟอกฆ่าเชื้อชิ้นส่วนพืช พบว่าทั้ง 4 วิธี ให้ผลการปลอดเชื้อและการงอกของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข43 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Table 1) จากการศึกษาของ Verma *et al.* (2017) ได้รายงานว่า การฟอกฆ่าเชื้อชิ้นส่วนพืชด้วยสารละลาย Clorox® ที่ความเข้มข้นน้อยเกินไปจะทำให้มีการปนเปื้อนมาก แต่การใช้สารละลาย Clorox® ที่ความเข้มข้นมากเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นส่วนพืชตายได้ ซึ่งการใช้ Clorox® 15% และ 30% อยู่ช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการฟอกฆ่าเชื้อเมล็ดข้าวพันธุ์ กข43 ดังนั้นในการทดลองนี้ การฟอกฆ่าเชื้อด้วยสารละลาย Clorox® 15% จึงมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองต่อไป เนื่องจากให้ผลการปลอดเชื้อและการงอกของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข43 สูง และเป็นวิธีที่ใช้เวลาและสารน้อย

Table 1 Effect of different 2, 4-D concentrations on callus induction frequency.

Treatments	5% Clorox® soaking time (hr.)	Clorox® concentration	Sterilization (%)	Seed germination (%)
1	6	15%	99.00	100.00
2	6	30%	98.00	99.00
3	0	15%	98.00	98.00
4	0	30%	97.00	100.00

การชักนำให้เกิดแคลลัส

จากการศึกษาการชักนำให้เกิดแคลลัสของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข43 บนสูตรอาหารที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า 2, 4-D มีผลต่อการชักนำให้เกิดแคลลัสของข้าวพันธุ์ กข43 โดยอาหารทุกสูตรที่เติม 2, 4-D สามารถชักนำให้เกิดแคลลัสได้ แต่สูตรอาหารที่ไม่มีการเติม 2, 4-D (ชุดควบคุม) ไม่สามารถชักนำให้เกิดแคลลัสได้ สูตรอาหารที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถชักนำให้เกิดแคลลัสได้น้อยที่สุด

(86.67%) และสูตรอาหารที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการชักนำให้เกิดแคลลัส 100.00% ทุกสูตร (Table 2) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Katiyar *et al.* (1999) และ Iqbal Khan *et al.* (2000) ที่รายงานว่าสามารถใช้ 2, 4-D ในการชักนำแคลลัสข้าว และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ 2, 4-D จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดแคลลัส 2, 4-D เป็นสารในกลุ่มออกซินซึ่งสามารถทำให้เซลล์มีการเปลี่ยนกลับเป็นเนื้อเยื่อเจริญ (dedifferentiation) และมีผลต่อการเริ่มการแบ่งเซลล์ (George *et al.*, 2008)

Table 2 Effect of different 2, 4-D concentrations on callus induction frequency.

2, 4-D concentration (mg L^{-1})	Callus induction frequency (%)
0	0.00
1.0	86.67
2.0	100.00
3.0	100.00
4.0	100.00
5.0	100.00

ชนิดของแคลลัส

จากการทดลองพบว่า แคลลัสที่เกิดขึ้นส่วนมากมีลักษณะเป็นแคลลัสชนิด compact callus โดยมีจำนวนมากที่สุดในสูตรอาหารที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ 2, 4-D แคลลัสชนิด compact callus จะมีจำนวนลดลง แต่แคลลัสชนิด friable callus มีจำนวนเพิ่มขึ้น (Table 3) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ สมดังใจ และคณะ (2554) ที่พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ 2, 4-D สูงขึ้นจะชักนำให้เกิดแคลลัสชนิด friable callus มากขึ้น ซึ่งแคลลัสชนิด compact callus และ friable callus มีการนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน โดยแคลลัสชนิด friable callus มักไม่เปลี่ยนเป็นอวัยวะ เหมาะสำหรับนำไปเพาะเลี้ยงเซลล์แขวนลอย ส่วนแคลลัสชนิด compact callus มักเจริญต่อไปเป็นอวัยวะและพัฒนาเป็นต้นใหม่ได้และ Salomé *et al.* (1985) รายงานว่าแคลลัสชนิด friable callus เป็นชิ้นส่วนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการแยกโปรโตพลาสต์ (protoplast isolation)

Table 3 Effect of different 2, 4-D concentrations on callus types.

2, 4-D concentration (mg L^{-1})	Number of callus				Total culture
	Compact callus	Friable callus	Mixed callus	No callus	
0	0	0	0	15	15
1.0	11	0	2	2	15
2.0	10	1	4	0	15
3.0	8	2	5	0	15
4.0	8	3	4	0	15
5.0	5	1	9	0	15

Mixed callus = compact and friable callus

สีของแคลลัส

สีของแคลลัสที่ได้สามารถจำแนกออกได้ทั้งหมด 3 สี คือ สีขาว, สีเหลือง และ สีน้ำตาล (Figure 1) โดยแคลลัสส่วนมากเป็นสีน้ำตาล และมีจำนวนมากที่สุดในแคลลัสที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตรที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีแคลลัสสีน้ำตาล 14 แคลลัส จากทั้งหมด 15 แคลลัส (Table 4) โดยสมดังใจ และคณะ (2554) ได้ระบุว่าเนื้อเยื่อแคลลัสที่มีสีเหลืองจะสามารถเจริญและพัฒนาต่อไปได้ แคลลัสสีขาวจะไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ และการที่เนื้อเยื่อแคลลัสเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลหรือสีดำ แสดงว่าเนื้อเยื่อถูกทำลายหรือถูกยับยั้งการเจริญเติบโต และเนื้อเยื่อนั้นจะตายในที่สุด สอดคล้องกับการศึกษาของ Karthikeyan *et al.* (2009) ที่รายงานว่าความเข้มข้นของ 2, 4-D ที่สูงมากเกินไปส่งผลยับยั้งการเจริญของเนื้อเยื่อ และเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนสีเนื้อเยื่อเป็นสีน้ำตาลของแคลลัส

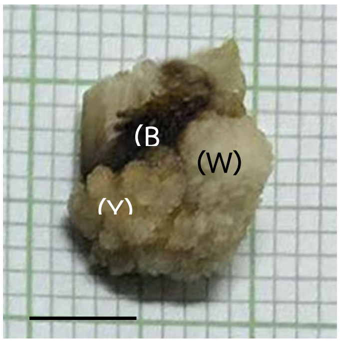


Figure 1 Callus was induced from mature seed of rice cv. RD43 after 4 weeks of incubation on MS medium supplemented with 4.0 mg L^{-1} 2, 4-D. W=White, Y=Yellow, B=Brown (scale bar = 0.5 cm.).

Table 4 Effect of different 2, 4-D concentrations on color of rice cv. RD43 callus.

2, 4-D concentration (mg L^{-1})	Number of callus					Total culture
	W+B	Y+B	W+Y+B	B	No callus	
0	0	0	0	0	15	15
1.0	1	2	5	5	2	15
2.0	1	0	8	6	0	15
3.0	2	3	2	8	0	15
4.0	1	2	8	4	0	15
5.0	0	0	1	14	0	15

W=White, Y=Yellow, B=Brown

น้ำหนักสดและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลลัส

น้ำหนักสดและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลลัสมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ 2, 4-D ที่เติมในอาหารเพิ่มมากขึ้นโดยน้ำหนักสดของแคลลัสมากที่สุดในอาหารที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ 39.58 มิลลิกรัม และ 0.73 เซนติเมตร ตามลำดับ รองลงมาคืออาหารที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ 31.70 มิลลิกรัม และ 0.66 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยทั้ง 2 ความเข้มข้น

ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดควบคุม ส่วนของแคลลัสที่เพาะเลี้ยงบนอาหารที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสด 8.41 และ 20.74 มิลลิกรัม ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.38 และ 0.55 เซนติเมตร ตามลำดับ แต่น้ำหนักสดและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลลัสจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหารที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ 16.33 มิลลิกรัม และ 0.52 เซนติเมตร ตามลำดับ

น้ำหนักสดและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลลัสมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ 2, 4-D ที่เติมในอาหารเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก 2, 4-D เป็นสารในกลุ่มออกซินมีความสามารถในการเพิ่มการยืดตัวของผนังเซลล์ ทำให้เซลล์ขยายขนาดขึ้นได้ (George *et al*., 2008) ส่วนน้ำหนักสดและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลลัสที่เพาะเลี้ยงบนอาหารที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Michiba *et al.* (2001) ที่ได้รายงานว่าเมื่อมีความเข้มข้นของ 2, 4-D มากเกินไปจะส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแคลลัสและ 2, 4-D ความเข้มข้นสูง ส่งผลให้ไม่เกิดการสร้างอวัยวะ ยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสง และสามารถชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์และได้ (Pierik, 1987)

Table 5 Effect of different 2, 4-D concentrations on fresh weight and average tissue diameter of rice cv. RD43 callus.

2, 4-D concentration (mg L^{-1})	Mean fresh weight of callus (mg)	Average tissue diameter (cm)
0	0.00 d	0.00 d
1.0	8.41 cd	0.38 c
2.0	20.74 b	0.55 b
3.0	31.70 a	0.66 a
4.0	39.58 a	0.73 a
5.0	16.33 bc	0.52 b

Mean values followed by different letters in each column indicating significant differences according to Duncan's Multiple Range Test ($p<0.05$)

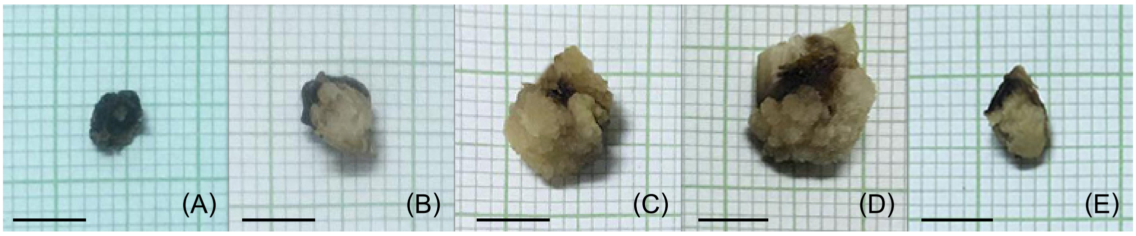


Figure 2 Callus of rice cv. RD43 after 4 weeks of incubation on MS media supplemented with 2, 4-D (A) 1.0 mg L^{-1}, (B) 2.0 mg L^{-1}, (C) 3.0 mg L^{-1}, (D) 4.0 mg L^{-1} and (E) 5.0 mg L^{-1} (scale bar = 0.5 cm.)

สรุป

การฟอกฆ่าเชื้อเมล็ดข้าวพันธุ์ กข43 ด้วยสารละลาย Clorox® 15% มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ผลการปลอดเชื้อและการงอกของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข43 สูง และเป็นวิธีที่ใช้เวลาและสารน้อย

2, 4-D มีผลในการชักนำให้เกิดแคลลัสของข้าวพันธุ์ กข43 โดยอาหารที่เติม 2, 4-D ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความเหมาะสมต่อการชักนำให้เกิดแคลลัสมากที่สุด เนื่องจากมีการชักนำให้เกิดแคลลัส 100%, แคลลัสที่ได้ส่วนมากเป็น compact callus มีสีเหลืองและขาวซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปชักนำให้เกิดอวัยวะใหม่ และเป็นสูตรอาหารที่ให้น้ำหนักสดและค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาครั้งนี้ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) Development and Promotion of Science and Technology Talents Project (DPST)

เอกสารอ้างอิง

ยงศักดิ์ ขจรผดุงกิตติ และ อัญชลี จาละ. 2558. อิทธิพลของ BA, IAA, 2, 4-D และ Kinetin ต่อการขยายพันธุ์ต้นแก้วมังกรจากไฮโปรคอทิลและใบจริงในสภาพปลอดเชื้อ. **Thai Journal of Science and Technology** 4 (2): 147-154.

สมดังใจ สายสิงห์ทอง, สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์ และ สุชาดา เวียรศิลป์. 2554. ผลของผงถ่าน กัมมันต์ และ 2, 4-D ต่อการเกิดแคลลัสของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1. **วารสารเกษตร** 27(3): 175-185.

อังศุธรย์ วสุสัณห์, สุนันทา วงศ์ปิยชน, ศรีวัฒนา ทรงจิตสมบูรณ์, วัชรี สุขวิวัฒน์, ปราณี มณีนิล และ สุพรรณิการ์ ปักเคธาติ. 2560. ข้าวพันธุ์กข43 ข้าวดัชนีน้ำตาลปานกลางสำหรับตลาดข้าวเฉพาะ. **วารสารวิชาการข้าว** 8 (2): 45-53.

George, E.F., M.A. Hall and G.J. De Klerk. 2008. **Plant Propagation by Tissue Culture.** 3rd ed. Springer, Netherlands.

Iqbal Khan, Z., A. Hussain and M. Sadiq. 2000. Role of plant growth regulators (auxin and cytokinin) in callus induction in rice (*Oryza sativa* L.) cv. DM-25. **Pakistan Journal of Biological Sciences** 3 (1): 157-159.

Karthikeyan, A., S.T.K. Pandian and M. Ramesh. 2009. High frequency plant regeneration from embryogenic callus of a popular *indica* rice (*Oryza sativa* L.). **Physiology and Molecular Biology of Plants** 15 (4): 371-375.

Katiyar, S.K., G. Chandel, P. Singh and R. Pratibha. 1999. Genetic variation and effect of 2, 4-D in *in-vitro* plant regeneration in *indica* rice cultivars. ***Oryza*** 36: 254-256.

Michiba, K., T. Okamoto and M. Mii. 2001. Increasing ploiding level in cell suspension cultures of *Doritaenopsis* by exogenous application of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid. **Physiology Planta** 112: 142-148.

Pierik, R.L.M. 1987. ***In vitro* Culture of Higher Plants.** The Hague: Martinus Nijhoff Publishers,.

Salomé, M., S. Pais, M. Margarida Oliveira and J. Barroso. 1985. Use of petiole segments of *Actinidia chinensis* (kiwi) for plant differentiation and production of friable calli for protoplast isolation. **Symposium on *In vitro* Problems Related to Mass Propagation of Horticultural Plants** 212: 687-690.

Tariq, M., G. Ali, F. Hadi, S. Ahmad, N. Ali and A.A. Shah. 2008. Callus induction and *in vitro* plant regeneration of rice (*Oryza sativa* L.). **Pakistan Journal of Biological Sciences** 1 (2): 255-259.

Taylor, R.J. and G.A. Secor. 1992. Average tissue diameter as a non-destructive determinant of potato protoplast-derived callus growth. **Environmental and Experimental Botany** 32 (1): 43-48.

Upadhyaya, G., M. Sen and A. Roy.2015. *In vitro* callus induction and plant regeneration of rice (*Oryza sativa* L.) var.'Sita','Rupali'and 'Swarna Masuri'. **Asian Journal of Plant Science and Research** 5 (5): 24-27.

Verma, S.K., K. Kingsley, I. Irizarry, M. Bergen, R.N. Kharwar and J.F. White Jr. 2017. Seed-vectored endophytic bacteria modulate development of rice seedlings. **Journal of Applied Microbiology** 122 (6): 1680-1691.

ผลของ BA, TDZ และ mT ต่อการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว

Effects of BA, TDZ and mT on *in vitro* Culture of *Cymbidium lowianum* Rchb. f.

อาทิตยา ทุมมา[1] **ณรงค์ วงศ์กันทรากร**[1*] และ ประศาสตร์ เกื้อมณี[1]

Atittaya Tumma[1], Narong Wongkantrakorn[1*] and Prasart Kermanee[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว (*Cymbidium lowianum* Rchb. f.) เมื่อเพาะเลี้ยงยอดของกล้วยไม้บนอาหารสูตร Murashige and Skoog (MS) สูตร MS ที่ลดความเข้มข้นของธาตุอาหารลง 50 เปอร์เซ็นต์ (½MS) และสูตร Vacin and Went (VW) เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่ากล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วเจริญเติบโตได้ดีที่สุดบนอาหารสูตร VW เมื่อทดสอบผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตในอาหารสูตร VW ที่เติม benzyladenine (BA), thidiazuron (TDZ) และ meta-topolin (mT) ที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 ไมโครโมลาร์ ต่อการเพิ่มจำนวนและการเจริญเติบโตโดยใช้ตาข้างเป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า กล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วเกิดยอดได้ดีที่สุดเมื่อเพาะเลี้ยงตาข้างบนอาหารที่เติม BA ความเข้มข้น 15 และ 20 ไมโครโมลาร์ โดยมีจำนวนยอดเฉลี่ย 1.33±0.33 ยอดต่อชิ้นส่วนพืช ส่วนตาข้างที่เพาะเลี้ยงบนอาหารที่เติม TDZ ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ ทำให้เกิดยอดที่มีความสูงและจำนวนใบมากที่สุด โดยมีความสูงเฉลี่ย 2.30±0.62 เซนติเมตร มีจำนวนใบเฉลี่ย 2.17±0.47 ใบต่อชิ้นส่วน จากผลการทดลอง สูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว เพื่อชักนำให้เกิดยอดและยอดมีการเติบโตที่ดี คือ สูตรอาหาร VW ที่เติม BA ความเข้มข้น 20 ไมโครโมลาร์

ABSTRACT

In vitro culture of *Cymbidium lowianum* Rhcb.f. was studied. Shoots of *C. lowianum* Rhcb.f. were cultured on Murashige and Skoog media (MS), half-strength MS (½MS) and Vacin and Went media (VW) for 8 weeks and showed that VW was the most suitable media for the growth of *C. lowianum* shoots. The lateral buds were cultured on VW media supplemented with 0, 5, 10 15, 20 and 25 µM benzyladenine (BA), thidiazuron (TDZ) or meta-topolin (mT) to monitored for growth and shoot generation for eight weeks. While the medium supplemented with 15 and 20 µM BA generated the highest average shoot number (1.33±0.33 shoots per explant), the medium supplemented with 10 µM TDZ provided the highest shoot length (2.30±0.62cm) and the highest leaf number (2.17±0.47 leaf per explant). The most effective growing medium for *C. lowianum* Rhcb.f. for shoot formation and shoot growth was VW medium supplemented with 20 µM BA.

Key words: benzyladenine, *Cymbidium lowianum*, *in vitro* culture, meta-topolin, micropropagation, orchid, thidiazuron

* Corresponding author; e-mail address: fscinrw@ku.ac.th

[1]ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Botany, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ประเทศไทยเป็นแหล่งรวบรวมความหลากหลายทางพันธุกรรมของกล้วยไม้ป่าจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีกล้วยไม้ป่าหลายชนิดลดจำนวนลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนเข้าสู่สภาวะใกล้สูญพันธุ์จากหลายสาเหตุ เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในระบบนิเวศอันเนื่องมาจากธรรมชาติ การบุกรุกพื้นที่ป่าเพื่อทำการเกษตรหรือปลูกสร้างที่พักอาศัยทำให้พื้นที่อาศัยของกล้วยไม้ลดน้อยลง และการลักลอบนำกล้วยไม้ออกจากพื้นที่ป่าเพื่อทำการค้า (ครรชิต, 2550; สลิลและเพชร, 2552) กล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว (*Cymbidium lowianum* Rchb.f.) เป็นกล้วยไม้ป่าที่พบอยู่ทางภาคเหนือของประเทศไทย มีช่อดอกที่สวยงาม โดยช่อดอกยาว 50-100 เซนติเมตร มีดอกช่อละ 12-40 ดอก ดอกขนาดใหญ่กว้าง 5-10 เซนติเมตร กลีบเลี้ยงและกลีบดอกมีสีเขียวถึงเขียวแกมเหลือง กลีบปากรูปรีกว้าง ปลายเรียวสอบ ขอบปากกลีบช่วงปลายมีสีส้มแดงรูปตัววี และสามารถนำมาเป็นไม้ประดับได้ เนื่องจากแนวโน้มในการลดจำนวนลงของกะเรกะร่อนปากนกแก้ว จึงมีแนวคิดขยายพันธุ์เพิ่มจำนวนกล้วยไม้ชนิดนี้ให้มากขึ้นเพื่อรองรับการปลูกทดแทน การพัฒนาเชิงการค้า และการอนุรักษ์

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มจำนวนกล้วยไม้ในสกุล *Cymbidium* ได้ (Nayak *et al*., 1997; Hossain *et al*., 2010) โดยสูตรอาหารที่นิยมใช้ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อคือสูตร Vacin and Went (VW) แต่ยังรายงานว่าอาหารเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อสูตร Murashige and Skoog (MS) ก็สามารถใช้ในการเพาะเลี้ยงได้ดีเช่นกัน โดยมีการเติมสารควบคุมการเจริญเติบโตเพื่อช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานของเนื้อเยื่อ โดยเฉพาะสารในกลุ่มไซโตไคนินที่สามารถกระตุ้นให้ชิ้นเนื้อเยื่อมีการพัฒนาไปเป็นยอดได้ดี

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว (*C. lowianum* Rchb.f.) โดยการทดสอบหาสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและผลของสารควบคุมการเจริญเติบโต benzyladenine (BA), thidiazuron (TDZ) และ meta-topolin (mT) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อการเพิ่มปริมาณยอดและการเจริญเติบโต

อุปกรณ์และวิธีการ

สูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว

เลือกต้นกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วที่มีขนาดและอายุใกล้เคียงกันในสภาพปลอดเชื้อ ตัดชิ้นส่วนยอดให้มีความสูง 2.5 เซนติเมตร นำไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์ 3 สูตร ได้แก่ MS, ½ MS และ VW สูตรละ 3 ซ้ำ ซ้ำละ 1 ชิ้น บ่มในห้องเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อที่ให้แสง 12 ชั่วโมงต่อวัน ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์ แล้วเปรียบเทียบหาสูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงโดยนับจำนวนใบ จำนวนราก และสังเกตสีของใบ

การเพิ่มจำนวนกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว

นำต้นกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร VW ในสภาพไม่มีแสง เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ต้นกล้วยไม้จะมีลักษณะยืดยาวเห็นตาข้างชัดเจน จากนั้นตัดตาข้างไปเพาะเลี้ยงบนอาหาร VW เป็นเวลา 1 สัปดาห์ แล้วนำชิ้นส่วนตาข้างที่ปลอดเชื้อมาเลี้ยงบนอาหารสูตร VW ที่เติม BA, TDZ และ mT ที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 ไมโครโมลาร์ อย่างละ 6 ซ้ำ นำไปเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อที่ให้แสง 12

ชั่วโมงต่อวัน ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์ บันทึกผลการทดลองโดยการนับจำนวดยอด จำนวนใบ จำนวนราก และวัดความสูงของยอด

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) โดยเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) เป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมด เพื่อให้ทราบความแตกต่างระหว่างกลุ่มประชากรทั้งหมด

ผลการทดลอง

สูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว

จากการทดลองนำต้นกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วไปเพาะเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน 3 สูตร ได้แก่ MS, ½ MS และ VW เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า กล้วยไม้มีการเจริญเติบโตได้ดีเมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร VW โดยมีจำนวนใบใหม่เฉลี่ยมากที่สุด 3.33±0.27 ใบต่อชิ้นส่วนพืช และลักษณะของต้นพืชมีสุขภาพดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในอาหารสูตร MS และ ½ MS ที่มีจำนวนใบใหม่เฉลี่ยเพียง 1.67±0.27 และ 1.33±0.27 ใบต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ และใบล่างมีสีเหลือง (Table 1)

Table 1 Effect of three culture media on the growth of *C. lowianum* (Mean ± SE).

Medium	Number of leaves per explant	Number of roots per explant
MS	1.67±0.27 a[1]	0.33±0.47 ns[2]
½ MS	1.33±0.27 a	1.33±0.47
VW	3.33±0.27 b	1.33±0.94

[1]Mean values within a column followed by the different letters are significantly different at $p \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test. [2]ns = nonsignificant

การเพิ่มจำนวนกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วบนอาหารสังเคราะห์สูตร VW ที่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโต 3 ชนิด ได้แก่ BA, TDZ และ mT ที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 ไมโครโมลาร์ เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า อาหารสังเคราะห์สูตร VW ดัดแปลง ที่เติม BA ความเข้มข้น 15 และ 20 ไมโครโมลาร์ สามารถชักนำให้เกิดยอดได้มากที่สุด 1.33±0.33 ยอดต่อชิ้นส่วนพืช ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดควบคุมที่ไม่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโต (1.00±0.26 ยอดต่อชิ้นส่วนพืช) (Table 2, Figure 1) โดยยอดที่เกิดขึ้นนั้นจะมียอดหลักหนึ่งยอดและยอดที่เกิดขึ้นบริเวณฐานมีลักษณะนูนขึ้น ปลายเรียวแหลม และในอาหารสังเคราะห์สูตร VW ที่เติม TDZ ความเข้มข้น 15, 20 และ 25 ไมโครโมลาร์ และ mT ความเข้มข้น 20 และ 25 ไมโครโมลาร์ พบว่า มีผลยับยั้งการเกิดยอดของกะเรกะร่อนปากนกแก้ว (Table 2)

นอกจากนี้ อาหารสังเคราะห์สูตร VW ที่เติม TDZ ความเข้มข้น 10 และ 15 ไมโครโมลาร์ มีผลทำให้กล้วยไม้มีจำนวนใบเฉลี่ยมากที่สุด 2.17±0.47 และ 2.17±0.54 ใบต่อชิ้นส่วนพืช ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างจากชุดควบคุมที่มีจำนวนใบเฉลี่ย 1.83±0.60 ใบต่อชิ้นส่วน และอาหารสังเคราะห์สูตร VW ที่เติม BA ความเข้มข้น 15 ไมโครโมลาร์ มีผลทำให้กล้วยไม้มีจำนวนใบเฉลี่ยน้อยที่สุด 0.83±0.40 ใบต่อชิ้นส่วนพืช (Table 2)

อาหารสังเคราะห์สูตร VW ที่เติม BA ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ และอาหารสังเคราะห์สูตร VW ที่เติม mT ความเข้มข้น 20 ไมโครโมลาร์ มีผลทำให้กล้วยไม้มีจำนวนรากเฉลี่ยมากที่สุด 1.00±0.36 และ 1.00±0.45 รากต่อชิ้นส่วนพืช ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดควบคุมที่มีราก 0.67±0.33 รากต่อชิ้นส่วนพืช และในอาหารสังเคราะห์สูตร VW ที่เติม TDZ ความเข้มข้น 15 และ 20 ไมโครโมลาร์ พบว่า ไม่มีรากเกิดขึ้น (Table 2)

อาหารสูตร VW ที่เติม TDZ ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ มีผลทำให้กล้วยไม้มีความสูงเฉลี่ยมากที่สุด 2.30±0.62 เซนติเมตร ซึ่งแตกต่างทางสถิติกับสูตรอาหาร VW ที่เติม TDZ ความเข้มข้น 20 ไมโครโมลาร์ ที่มีความสูงเฉลี่ยน้อยที่สุด 0.54±0.34 เซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตามความสูงของยอดของทั้ง 2 ชุดการทดลองนี้ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับชุดควบคุมที่มีความสูง 1.07±0.34 ซนติเมตร (Table 2)

วิจารณ์ผลการทดลอง

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วบนอาหารสังเคราะห์ 3 สูตร ได้แก่ MS, ½ MS และ VW เพื่อหาสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต พบว่ากล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนอาหารสังเคราะห์สูตร VW โดยมีจำนวนใบและรากมากที่สุด ส่วนอาหารสังเคราะห์สูตร MS และ ½ MS พบว่ามีการเจริญเติบโตไม่ดีเท่า VW เพราะมีการพัฒนาของใบและรากน้อยกว่าและใบด้านล่างมีสีเหลือง

ถึงแม้ว่าอาหารสูตร MS จะเป็นสูตรที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายกับพืชหลากหลายชนิดรวมทั้งกล้วยไม้ด้วย แต่โดยส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้อาหารสูตร VW ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้ (Zahara *et al.*, 2017) ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบและปริมาณของสารเคมีในสูตรอาหาร MS ที่มีมากกว่าสูตร VW ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกล้วยไม้ อย่างไรก็ตามความต้องการธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของกล้วยไม้นั้น ก็มีความแตกต่างกันไปตามชนิดและระยะการเจริญเติบโตของกล้วยไม้ เช่น Park *et al.* (1996) รายงานว่าอาหารเหลวสูตร VW เป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มจำนวน protocorm like bodies (PLB) ของ *Phalaenopsis* และช่วยส่งเสริมการงอกของเมล็ดเจริญไปเป็น protocorms ของ *Eulophia aita* (Johnson *et al.*, 2007) และสามารถชักนำให้ protocorms ของ *Bletia purpurea* ให้เกิดใบจำนวนมากเมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร VW (Dutra *et al.*, 2007) มีการเปรียบเทียบการงอกของเมล็ด *Cymbidium mastersii* บนอาหาร 4 สูตร พบว่า เมล็ดกล้วยไม้สามารถงอกได้ดีบนอาหารสูตร MS, ½ MS, KC และ VW ตามลำดับ (Mohanty *et al.*, 2012) เมล็ดของ *Cymbidium iridioides* สามารถงอกได้เฉพาะบนอาหารสูตร MS เท่านั้น แต่ไม่สามารถงอกได้บนอาหารสูตร B5 (Pant and Swar, 2011) เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดกล้วยไม้ *Cymbidium aloifolium* สูงสุดเมื่อเพาะบนอาหารสูตร New Dogashima (ND) ซึ่งสูงกว่าการเพาะบนอาหารสูตร MS, ½ MS และ ¼ MS

(Trunjaruen and Taratima, 2018) อาหารสูตร VW ดัดแปลงทำให้ชิ้นส่วนปลายยอดของ *Vanda coerulea* เจริญเติบโตได้ดีกว่าการเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (Jitsopakul *et al*., 2013)

Table 2 Effects of BA, TDZ and m-T on shoot- and root-formations through *in vitro* nodes of *C. lowianum* after 8 weeks of culture. (Mean ± SE).

Plant growth regulator	concentration (µM)	Number of shoots per explant	Number of leaves per explant	Number of roots per explant	Plantlet height (cm)
-	-	1.00±0.26^{abc1}	1.83±0.60 ns^{2}	0.67±0.33^{ab}	1.07±0.34^{abcd}
BA	5	1.17±0.17^{bc}	1.67±0.55	0.83±0.31^{ab}	1.17±0.36^{abcd}
	10	1.00±0.00^{abc}	2.00±0.25	1.00±0.36^{b}	2.23±0.39^{cd}
	15	1.33±0.33^{c}	0.83±0.40	0.17±0.17^{ab}	0.80±0.20^{ab}
	20	1.33±0.33^{c}	1.17±0.40	0.83±0.31^{ab}	1.55±0.45^{abcd}
	25	1.00±0.00^{abc}	1.33±0.49	0.17±0.17^{ab}	1.49±0.56^{abcd}
TDZ	5	1.00±0.00^{abc}	1.83±0.30	0.50±0.22^{ab}	1.98±0.23^{bcd}
	10	1.17±0.17^{bc}	2.17±0.47	0.50±0.22^{ab}	2.30±0.62^{d}
	15	0.83±0.17^{abc}	2.17±0.54	0.00±0.00^{a}	1.38±0.37^{abcd}
	20	0.50±0.22^{a}	1.33±0.67	0.00±0.00^{a}	0.54±0.34^{a}
	25	0.67±0.21^{ab}	1.67±0.67	0.17±0.41^{ab}	1.25±0.46^{abcd}
mT	5	1.00±0.00^{abc}	1.50±0.22	0.50±0.22^{ab}	1.51±0.25^{abcd}
	10	1.00±0.00^{abc}	1.17±0.17	0.67±0.21^{ab}	1.27±0.18^{abcd}
	15	1.00±0.00^{abc}	1.67±0.21	0.83±0.16^{ab}	0.92±0.21^{abc}
	20	0.67±0.21^{ab}	1.17±0.54	1.00±0.45^{b}	1.39±0.54^{abcd}
	25	0.83±0.17^{abc}	1.33±0.49	0.83±0.41^{ab}	1.37±0.33^{abcd}

[1]Mean values within a column followed by the different letters are significantly different at $p \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test. [2]ns = nonsignificant

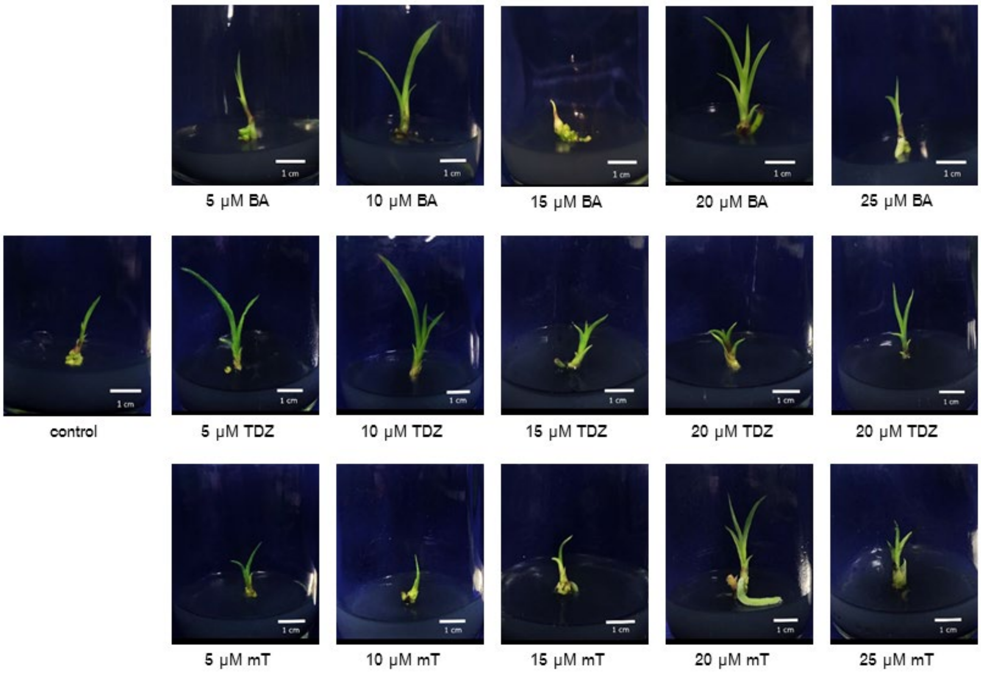


Figure 1 Development of *C. lowianum* plantlets through *in vitro* node culture on VW media supplemented with BA, TDZ and mT at different concentrations for 8 weeks.

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วบนสูตรอาหาร VW ที่เติม BA TDZ และ mT ที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 ไมโครโมลาร์ พบว่าอาหารที่เติม BA 15 และ 20 ไมโครโมลาร์ มีผลกระตุ้นให้มีการสร้างยอดได้ดี โดยลักษณะยอดเริ่มแรกที่เห็นจะมีขนาดเล็กเป็นสีเขียวนูนแล้วจะยืดตัวอย่างช้า ๆ มีการสร้างใบ และพัฒนาไปเป็นต้นพืช (Tawaro *et al.*, 2008) ซึ่งสอดคล้องกับการเพาะเลี้ยงกล้วยไม้ *Cymbidium giganteum* Wall. Ex Lindl. ที่สามารถชักนำให้เกิดยอดมากที่สุดเมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหารที่เติม BAP ความเข้มข้น 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (Hossain *et al.*, 2010) และจำนวนตาต่อชิ้นส่วนและจำนวนยอดต่อชิ้นส่วนตายอดของ *Vanda coerulea* สูงที่สุดเมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร VW ที่เติม BA ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (Jitsopakul *et al.*, 2013) Roy and Banerjee (2003) สามารถชักนำให้เกิดแคลลัสจากตาข้างของ *Dendrobium fimbriatum* Lindl. var. *oculatum* Hk. f. บนอาหารที่เติม BAP ความเข้มข้น 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นจะส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโต

ส่วนผลของ TDZ และ mT นั้น พบว่า มีผลในการชักนำการเกิดยอดในกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วไม่ดีนัก ซึ่งแตกต่างจากหลายการศึกษาที่พบว่าการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตทั้ง 2 ชนิดนี้ สามารถกระตุ้นการเกิดยอดและการพัฒนาของกล้วยไม้ในด้านอื่น ๆ อีกด้วยเช่น อาหารสังเคราะห์ที่เติม TDZ มีประสิทธิภาพในการกระตุ้นการพัฒนาตาไปเป็นยอดของ *Phalaenopsis* ได้สมบูรณ์ดีกว่า BAP โดยตาจะพัฒนาไปเป็นยอดได้ดีที่สุดในอาหารที่เติม TDZ ความเข้มข้น 5 ไมโครโมลาร์ (Chen and Piluek, 1995) อาหารที่เติม TDZ ที่ความเข้มข้น 2.2-4.5 ไมโครโมลาร์ สามารถชักนำให้เกิดยอดมากในกล้วยไม้ *Cymbidium aloifolium* (L.) Sw., *Dendrobium aphyllum* (Roxb.) Fisch และ *Dendrobium moschatum* (Buch-Hum) Sw. แต่การเพาะเลี้ยงกล้วยไม้ทั้ง 3 ชนิดบนอาหารที่เติม TDZ ไม่เกิดแคลลัส และ PLB และ TDZ ที่ความเข้มข้นสูงกว่านี้จะมีผลยับยั้งการเกิดยอด (Nayak *et al.*, 1997) Roy *et al.* (2012) พบว่าอาหารที่เติม TDZ ความเข้มข้น 20 ไมโครโมลาร์

กระตุ้นให้เกิด PLB ได้มาก แต่ PLB พัฒนาไปเป็นต้นและรากได้ไม่ดี ส่วน TDZ ที่ความเข้มข้นต่ำ (0.909 และ 3.636 ไมโครโมลาร์) นั้นชักนำให้เกิด PLB ได้น้อยกว่า แต่ PLB มีการพัฒนาของยอดและรากได้ดี ทำให้ได้ต้นพืชที่มีลักษณะดีกว่า TDZ ที่ความเข้มข้นสูง นอกจากนี้ยังสามารถชักนำให้ปลายยอดและหัวเทียมของ *Lycaste aromatica* (Graham ex Hook) Lindl เกิดยอดบนอาหารที่เติม TDZ และสามารถชักนำยอดจากส่วนหัวเทียมได้ดีกว่าส่วนปลายยอด (Mata-rosas *et al*., 2010) ในส่วนของ mT นั้น มีรายงานว่าอาหารที่เติม mT 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถชักนำให้ชิ้นส่วนตาข้างของกล้วยไม้ *Dendrobium nobile* เกิดยอด 72 เปอร์เซ็นต์ มีจำนวนยอดเฉลี่ย 2 ยอดต่อชิ้นส่วนพืช (Bhattacharyya *et al*., 2017) Vasudevan and Staden (2011) พบว่าอาหารที่เติม meta-topolin riboside (mTR) ส่งผลชักนำให้ชิ้นส่วนตาข้างและตายอด *Ansellia africana* มีความยาวยอด จำนวนใบ การเกิดราก ความยาวราก และน้ำหนักสดเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไซโตไคนินที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้จำนวนยอดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชหลายชนิด ที่พบว่าความเข้มข้นที่สูงเกินไปของไซโตไคนินจะมีผลยับยั้งการยืดตัวของยอดและราก ทำให้ยอดที่มีลักษณะแคระแกร็นผิดปกติ (Vasudevan and Staden, 2011) มีผลยับยั้งการเกิดยอด (Nayak *et al.,* 1997) ส่งผลทำให้เกิดการตายของต้นพืช (Fang *et al*., 2011) หรือจะส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโต และอาจส่งผลให้บริเวณเนื้อเยื่อปลายยอดตาย (Roy and Banerjee, 2003)

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้วนั้น พบว่า อาหารสังเคราะห์สูตร VW เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว และสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกล้วยไม้กะเรกะร่อนปากนกแก้ว คือ สูตรอาหาร VW ที่เติม BA ความเข้มข้น 20 ไมโครโมลาร์ ถึงแม้ว่าจะให้จำนวนยอดที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญจากชุดควบคุม แต่เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นจำนวนมากขึ้นก็จะทำให้ได้จำนวนยอดที่มากขึ้น และได้ยอดที่มีความสูงมากซึ่งอาจส่งผลให้นำไปเพาะเลี้ยงต่อหรือย้ายปลูกได้ประสบผลสำเร็จมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ครรชิต ธรรมศิริ. 2550. **เทคโนโลยีผลิตกล้วยไม้**. ปรับปรุงครั้งที่ 2. อัมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ.

สลิล สิทธิสัจจธรรม และเพชร ตรีเพ็ชร. 2552. **กล้วยไม้ป่าเมืองไทย 2**. สำนักพิมพ์บ้านและสวน, กรุงเทพฯ.

Bhattachryya, P., S. Kamaria and P. Tandon. 2016. High frequency regeneration protocol for *Dendrobium nobile.* A model tissue culture approach for propagation of medicinally important orchid species. **South African Journal of Botany** 104: 232-243.

Chen, Y. and C. Piluek. 1995. Effects of thidiazuron and N^6-Benzylaminopurine on shoot regeneration of *Phalaenopsis.* **Plant Growth Regulation** 16: 99-101.

Dutra, D., T.R. Johnson, P.J. Kauth, S.L. Stewart, M.E. Kane and L. Richardson. 2007. Asymbiotic seed germination, *in vitro* seedling development, and greenhouse acclimatization of the threatened terrestrial orchid *Bletia purpurea*. **Plant Cell Tissue and Organ Culture** 94: 11-21.

Fang, Z., W. Huang, S. Zeng, K. Wu, Z. Chen, M. Zhang and J. Duan. 2011. *In vitro* propagation of *Cymbidium nanutum* Y.S. Wu, S.C. Chen. **Propagation of Ornamental Plants** 11 (3): 149-155.

Hossain, M.M., M. Sharma, J.A.T. da Silva and P. Pathak. 2010. Seed germination and tissue culture of *Cymbidium giganteum* Wall. Ex Lindl. **Scientia Horticuturae** 123: 479-487.

Jitsopakul, N., K. Thammasiri and K. Ishikawa. 2013. Efficient adventitious shoot regeneration from shoot tip culture of *Vanda coerulea*, a Thai orchid. **Science Asia** 39: 449-455.

Johnson, T.R., S.L. Stewart, D. Dutra, M.E. Kane and L. Richardson. 2007. Asymbiotic and symbiotic seed germination of *Eulophia alta* (Orchidaceae) - preliminary evidence for the symbiotic culture advantage. **Plant Cell Tissue and Organ Culture** 90: 313-323.

Mata-rosas, M.R., J. Baltazar-Garcia, P. Moon, P. Hietz and V.E. Luna-Monterrojo. 2010. *In vitro* regeneration of *Lycaste aromatica* (Graham ex Hook) Lindl. (Orchidaceae) from pseudobulb sections. **Plant Biotechnal Reports** 4: 157-163.

Mohanty, P., S. Paul, M.C. Das, S. Kumaria and P. Tandon. 2012. A simple and efficient protocol for the mass propagation of *Cymbidium mastersii*: An ornamental orchid of Northeast India. **AoB PLANTS**: pls023; doi:10.1093/aobpla/pls023.

Nayak, N.R., S.P. Rath and S. Patnaik. 1997. *In vitro* propagation of three epiphytic orchids, *Cymbidium aloifolium* (L.) Sw. *Dendrobium aphyllum* (Roxb.) Fisch. and *Dendrobium moschatum* (Buch-Hum) Sw. through thidiazuron-induced high frequency shoot proliferation. **Scientia Horticulturae** 71: 243-250.

Pant, B. and S. Swar. 2011. Micropropagation of *Cymbidium iridioides*. **Nepal Journal of Science and Technology** 12: 91-96.

Park, Y.S., S. Kakuta., A. Kano and M. Okabe. 1996. Efficient propagation of protocorm-like bodies of *Phalaenopsis* in liquid medium. **Plant Cell Tissue and Organ Culture** 45: 79-85.

Roy, J. and N. Benerjee. 2003. Induction of callus and plant regeneration from shoot-tip explants of *Dendrobium fimbriatum* Lindl. var. *oculatum* Hk. f. **Scientia Horticuturae** 97: 333-340.

Roy, A.R., S. Sajeev, A. Pattanayak and B.C. Deka. 2012. TDZ induced micropropagation in *Cymbidium giganteum* Wall. Ex Lindl. and assessment of genetic variation in the regenerated plants. **Plant Growth Regulation** 68: 435-445.

Tawaro, S., P. Suraninpong and S. Chanprame. 2008. Germination and regeneration of *Cymbidium findlaysonianum* Lindl. on a medium supplemented with some organic sources. **Walailak Journal of Science and Technology** 5 (2): 125-135.

Trunjaruen, A. and W. Taratima. 2018. An effective micropropagation of *Cymbidium aloifolium* (L.) Sw. **Thai Journal of Botany** 10 (1): 77-91.

Vasudevan, R. and J. Van Staden. 2011. Cytokinin and explant types influence *in vitro* plant regeneration of Leopard orchid (*Ansellia africana* Lindl.). **Plant Cell Tissue and Organ Culture** 107: 123-129.

Zahara, M., A. Datta, P. Boonkorkaew and A. Mishra. 2017. The effects of different media, sucrose concentrations and natural additives on plantlet growth of *Phalaenopsis* hybrid ‘Pink’. **Brazilian Archives of Biology and Technology** 60: e17160149.

การระบุชนิดของโปรตีนไวเทลโลเจนินในน้ำเลือดปูทะเล (*Scylla serrata* Forsskal, 1775) โดยใช้เทคนิค LC-MS/MS

Identification of Vitellogenin Protein in Hemolymph of Mud Crab (*Scylla serrata* Forsskal, 1775) Using LC-MS/MS Technique

ธนเสฏฐ์ ทองใสเกลี้ยง[1*]

Thanaset Thongsaiklaing[1*]

บทคัดย่อ

ไวเทลโลเจนิน (Vg)เป็นโปรตีนตั้งต้นของโปรตีนไวเทลลิน (Vn) ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาการของตัวอ่อน ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบของโปรตีนในน้ำเลือดปูทะเล (*Scylla serrata* Forsskol, 1775) เพศผู้และเพศเมียระยะไข่ด้วยเทคนิคการแยกโปรตีน 1 มิติ (1-dimension SDS-PAGE) พบว่ามีโปรตีนขนาดมวลโมเลกุลประมาณ 90 กิโลดาลตัน (kDa) ที่พบเฉพาะในน้ำเลือดของปูเพศเมียเท่านั้น และเมื่อย่อยโปรตีนดังกล่าวด้วยเอนไซม์ trypsin และนำโปรตีนไลเซท (protein lysate) ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS พบชิ้นส่วนโปรตีนทั้งหมด 7 ชิ้นประกอบด้วยลำดับกรดอะมิโน ดังนี้ VLASPTLHR, LYGPQYGQFQADFFAR, DLVLNDVYR, GLLGLYDNERANDR, VGGQSSQELQIEVDIPDKMEIIR, EADVEVNLK และ LLSSVTHGK ซึ่งการวิเคราะห์ความเหมือนของลำดับกรดอะมิโนที่ได้กับฐานข้อมูลโปรตีนพบว่าชิ้นส่วนโปรตีนทั้ง 7 ชนิดมีความเหมือนกับโปรตีนไวเทลโลเจนินในปู red crab (*Charybdis feriatus*) มากที่สุด

ABSTRACT

Vitellogenin (Vg) is a precursor of the yolk protein vitellin (Vn), an essential for embryonic development. In this study, I report the comparison of protein contents in mud crab (*Scylla serrata* Forsskol, 1775) hemolymph between male and female (stage III) using 1-dimension SDS-PAGE was performed. The protein with size approximately 90 kDa was specifically observed in hemolymph of female crab. The protein was digested with trypsin and protein lysate was further analyzed by LC MS/MS techniques. The results showed 7 protein fragments consisted of the following amino acid sequences; EADVEVNLK, LLSSVTHGK, VLASPTLHR DLVLNDVYR, LYGPQYGQFQADFFAR, VGGQSSQELQIEVDIPDKMEIIR and GLLGLYDNERANDR. The similarity analysis of amino acid sequence with protein database, showed that all 7 protein fragments were similar as a vitellogenin protein in red crab (*Charybdis feriatus*).

Key words: mud crab, *Scylla serrata*, vitellogenin protein, LC MS/MS

*Corresponding author; e-mail address: thanasetfdr@gmail.com

[1]ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพและอณูชีววิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ นราธิวาส 96000

[1]Biotechnology and Molecular Biology Laboratory, Faculty of Agriculture, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat 96000

คำนำ

ไวเทลโนจีนิน (Vitellogenin, Vg) เป็นโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ (น้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 200 kDa) เป็นโปรตีนตั้งต้นในการสังเคราะห์โปรตีนไวเทลลิน (Vitellin, Vn) ซึ่งเป็น lipo-glyco-carotenoprotein ที่เมื่อถูกตัดด้วยเอนไซม์โปรติเอสแล้วจะมีขนาดโมเลกุลเล็กลง ซึ่งถูกนำไปเก็บสะสมไว้ในโอโอไซด์ (Oocytes) ซึ่งเป็นแหล่งสะสมกรดอะมิโน ไขมัน คาร์โบไฮเดรท สารสีและแร่ธาตุต่างๆ ที่ใช้เป็นอาหารสำรองระหว่างกระบวนการเจริญและพัฒนาของตัวอ่อนในสัตว์จำพวกกุ้งปู โปรตีนไวเทลโลเจนินที่ถูกสังเคราะห์ในตับและตับอ่อน (hepatopancreas) จะถูกขนส่งผ่านน้ำเลือด (hemolymph) และเข้าสู่โอโอไซด์โดยผ่านกระบวนการเอนโดไซโตซิส (Endocytosis) (Tsukimura *et al*., 2001, Khalaila *et al*., 2004; Tsukimura *et al*., 2001)

การศึกษาสมบัติทางชีวเคมีของโปรตีนไวเทลโลเจนินมีรายงานมาแล้วใน spider crab (*Libinia enorinata*), littoral crab (*Carcinus maenas*), san crab (*Emerita asiatica*) (Tirumalai and Subramoniam, 1992), red crab (*Charybdis feriatus*) (Mak *et al*., 2005), Asia paddle crab (*Charybdis japonica*), land crab (*Potamon potamios*) (Pateraki and Stratakis, 2000), marine crab (*Portunus trituberculatus*) (Yang *et al*., 2005) และ blue crab (*Callinectes sapidus*) (Zmora *et al*., 2007) โดยพบว่าขนาดของโปรตีนไวเทลโลเจนินในปูแต่ละชนิดมีพบว่ามีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันและเมื่อโปรตีนไวเทลโลเจนินถูกตัดด้วยเอนไซม์โปรติเอสแล้ว จะถูกย่อยออกเป็นหน่วยย่อยที่มีขนาดโมเลกุลแตกต่างกันไป เช่น โปรตีนไวเทลโลเจนินที่ย่อยได้โปรตีน 6 หน่วยย่อยได้แก่ *E. Asiatica* ที่ประกอบด้วยโปรตีนหน่วยย่อยที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 42 ถึง 65 kDa โปรตีนไวเทลโลเจนินที่ย่อยได้โปรตีนหน่วยย่อย 3 หน่วยย่อย ได้แก่ *P. potamios* โดยมีน้ำหนักโมเลกุลขนาด 115, 105 และ 85 kDa โปรตีนไวเทลโลเจนินของปู *P. trituberculatus* เมื่อย่อยแล้วได้หน่วยย่อยมีน้ำหนักโมเลกุลขนาด 102, 100 และ 85 กิโลดาลตัน (kDa) (Yang *et al*., 2005) ในขณะที่โปรตีนไวเทลโลเจนินที่ย่อยได้ของ *C. feriatus* เมื่อย่อยแล้วได้โปรตีนหน่วยย่อยขนาด 78.2, 120.4 และ 87.4 kDa (Mak *et al*., 2005) และในปู *C. sapidus* พบโปรตีนหน่วยย่อยขนาด 119.4, 87.9 และ 87.5 kDa โปรตีนไวเทลโลเจนินที่ประกอบด้วยโปรตีนเพียงหน่วยย่อย 2 หน่วยย่อยที่มีน้ำหนักโมเลกุล 97 และ 74 kDa พบได้ใน *Eriocheir sinesis* (Chen *et al*., 2004)

การศึกษาครั้งนี้เป็นการแยกขนาดโมเลกุลโปรตีนในฮีโมลิมป์ของปูทะเลเพศเมียระยะไข่ (ระยะที่ 3)และเพศผู้บนแผ่นเจลแยกโปรตีน 1 มิติ (1-dimension SDS-PAGE) และนำโปรตีนของปูทะเลเพศเมียที่มีการแสดงออกแตกต่างจากปูทะเลเพศผู้กันไประบุชนิดของโปรตีนโดยวิธี LC-MS/MS โดยผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะนำไปศึกษาถึงคุณสมบัติของโปรตีนไวเทลโนจีนินของปูทะเล *S. serrata* ในเชิงลึกต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ตัวอย่างปูทะเล

ตัวอย่างปูทะเลเพศเมียระยะไข่ (ระยะที่ 3) และเพศผู้ จำนวนเพศละ 3 ตัว จากฟาร์มปู อ. ขลุง จ.จันทบุรี ทำให้สลบโดยแช่ในน้ำแข็งเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นใช้ผ้าซับตัวปูให้แห้ง เช็ดบริเวณขาเดินคู่ที่ 4 และ 5 ด้วยเอทานอล 70% ใช้เข็มฉีดยาเบอร์ 21 เจาะและดูดน้ำเลือดแล้วนำตัวอย่างเลือดเก็บในหลอด 1.5 มิลลิลิตรที่มี 10% trisodium citrate (อัตราส่วน 1:5) จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเลือดมาปั่นเหวี่ยงที่ 4,500 rpm $4^{o}C$ นาน 15 นาที ดูดส่วนใสใส่หลอดใหม่เพื่อนำไปวิเคราะห์หรือเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

การแยกขนาดโปรตีนด้วยวิธี SDS-PAGE

นำตัวอย่างน้ำเลือดวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนตามวิธีของ Bradford (1967) และใช้โปรตีน 20 ไมโครกรัม ผสมกับ 3X SDS-sample buffer (1.0 Tris-HCl pH 6.8, 10% SDS, 2-mercaptoethanol, 0.1% bromophenol blue) แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 5 นาที และวิเคราะห์บน 12.5% SDS-PAGE โดยใช้วิธีของ Laemmli (1970) ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ 100 โวลต์ เวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำเจลที่ได้ไปย้อมสีใน staining solution (0.1% coomassie brilliant blue R-250, 40% methanol, 10% acetic acid) ประมาณ 30 นาทีแล้วนำไปล้างสีออกใน destaining solution (40% methanol, 10% acetic acid) ประมาณ 8 ชั่วโมงหรือข้ามคืนและคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนโดยหา relative migration distance (R_f)

การวิเคราะห์หาลำดับกรดอะมิโนด้วยเทคนิค LC-MS/MS

นำแถบโปรตีนขนาดประมาณ 90 kDa บนเจล SDS-PAGE มาย่อยด้วยเอนไซม์ทริปซินจากนั้นนำโปรตีนที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ทริปซินฉีดเข้าเครื่อง Liquid chromatography–mass spectrometry/ mass spectrometry (LC-MS/MS) รุ่น Finnigan LTQ linear ion trap mass spectrometer, LC separation and MS analysis, HPLC system: Finnigan Surveyor™ MS pump with a flow splitter, column: 0.18×100 mm C18 (Thermo Electron Cooperation), flow rate 200 µl/min, mobile phase A: 0.1% formic acid ในน้ำ B: 0.1% formic acid ใน acetonitrile, gradient: 2-60%B 20 นาที 65-80%B 5 นาที และ 80-2%B 2 นาที Mass Spectrometer Finnigan LTQ, Ionization mode: NanoSpray, positive ion, capillary temperature 200, spray needle voltage 1.8 KV, mass range 400-1,600 m/z, scan sequence: Full-scan MS, MS/MS scan, acquisition modes: Normal, Data Dependent™ and Dynamic Exclusion™ ที่หน่วยบริการชีวภาพ (Bioservice Units) ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์แห่งชาติ จังหวัดปทุมธานี

การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LC MS/MS มาระบุชนิดของโปรตีนด้วยซอฟแวร์ Turbo SEQUEST algorithm in the BioWorks™3.1SR1 software package (Thermo Electron) จากฐานข้อมูล nr.fasta

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการแยกขนาดของโปรตีนด้วยวิธี SDS-PAGE

จากการศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในน้ำเลือดของปูทะเลเพศเมียระยะไข่และเพศผู้พบว่ามีแถบโปรตีนหลายแถบอยู่ในช่วงน้ำหนักโมเลกุล 28 ถึง 209 kDa แต่เมื่อเปรียบเทียบแถบโปรตีนระหว่างเพศเมียระยะไข่และเพศผู้พบว่าในปูทะเลเพศเมียระยะไข่มีแถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 90 kDa ซึ่งแตกต่างจากปูทะเลเพศผู้อย่างชัดเจน (Figure 1)

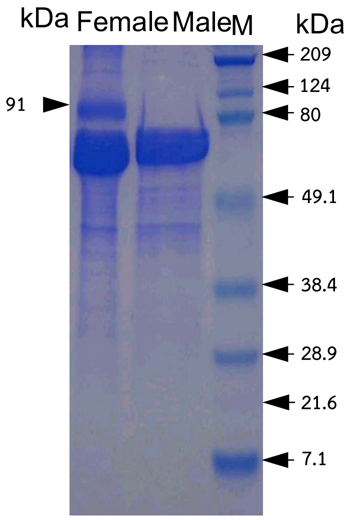


Figure 1 The protein expression pattern of hemolymph on 12.5% SDS-PAGE.

การวิเคราะห์ลำดับกรดอะมิโน

จากการนำแถบโปรตีนขนาดประมาณ 90 kDa มาย่อยด้วยเอนไซม์ทริปซินและวิเคราะห์ชิ้นส่วนโปรตีนด้วยเครื่อง LC MS/MS พบว่าชิ้นส่วนโปรตีน 7 ชิ้นมีลำดับกรดอะมิโนดังแสดงใน Table 1 และ Figure 2 จากนั้นนำข้อมูลกรดอะมิโนของชิ้นส่วนโปรตีนทั้ง 7 ชิ้นไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลโปรตีน พบว่าชิ้นส่วนโปรตีนทั้งหมดมีความเหมือนกับโปรตีนไวเทลโลจีนินในปู *C. feriata* มากที่สุด (Figure 3) โดยมีการกระจายของตำแหน่งของชิ้นส่วนโปรตีนทั้ง 7 ชิ้น หลังจากจุดตัดตำแหน่งแรก (RERR) ไปจนถึงส่วนปลายของเส้นโปรตีน ทำให้เชื่อได้ว่าเป็นโปรตีนไวเทลโลเจนินที่ถูกตัดและถูกนำส่งออกมาที่น้ำเลือดปูทะเลเพศเมียแล้ว

ไวเทลโลเจนินเป็นโปรตีนตั้งต้นในกระบวนการสร้างโปรตีนไวเทลลิน โดยไวเทลโลเจนินถูกสังเคราะห์บริเวณตับอ่อนจากนั้นจะมีการตัดให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงครั้งแรกก่อนปลดปล่อยสู่น้ำเลือดและเข้าสู่รังไข่เพื่อตัดอีกเป็นครั้งที่สองก่อนสะสมในรูปของโปรตีนไวเทลลิน (Mak *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2005; Zmora *et al.*, 2007) โดยมีลำดับกรดอะมิโนที่เป็นตำแหน่งตัด (consensus motif) RXXR ของเอนไซม์ subtilisin-like endopeptidase (Chen and Raikhel, 1996) ใน *C. feriatus*, *P.trituberculatus* และ *C. sapidus* พบว่ามีลำดับกรดอะมิโนที่เป็นตำแหน่งตัดของโปรตีนไวเทลโลเจนินตำแหน่งแรกในตับอ่อนมีลำดับ RERR motif เหมือนกันในปูทั้งสามชนิด ส่วนตำแหน่งตัดที่สองในรังไข่มีรายงานเฉพาะใน *C. feriatus* จากการตัดครั้งแรกได้โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาด ขนาด 78.2 และ 207.8 kDa ตัดครั้งที่สองที่ตำแหน่งลำดับกรดอะมิโน KLSR motif ของชิ้น 207.8 kDa ได้ชิ้นส่วนโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาด 120.4 และ 87.4 kDa (Mak *et al.*, 2005) ส่วน Zmora et al. (2007) รายงานว่าโปรตีนไวเทลโลเจนินใน *C. sapidus* ที่มีการตัดครั้งแรกประกอบด้วยโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 78.5 และ 207.3 kDa จากนั้นถูกตัดเป็นครั้งที่สอง ในรังไข่บริเวณตำแหน่งตัดของโปรตีนขนาด 207.3 kDa รวมทั้งหมดได้ชิ้นส่วนโปรตีน 3 ชิ้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 78.5, 119.42, และ 87.9 kDa ตามลำดับ ในขณะที่ *P. trituberculatus* พบว่าชิ้นโปรตีนไวเทโลเจนินประกอบด้วยขนาด 102, 100 และ 85 kDa ในรังไข่แต่ไม่พบในตับอ่อน (Yang *et al.*, 2005) จากการเปรียบเทียบตำแหน่งชิ้นส่วนโปรตีนทั้ง 7 ชิ้นกับโปรตีนไวเทลโลเจนินของ *C. feriata* พบจุดตัดตำแหน่งแรกอยู่เหนือลำดับ LYGPQYGQFQADFFAR ขึ้นไป 13 กรดอะมิโน ซึ่งเป็นไปได้ว่าเป็นจุดตัดจุดแรกที่แยกขนาดของโปรตีนไวเทลโลเจนินของ *S. serrata* ออกเป็นสองชิ้นส่วน

Table 1 The amino acid sequences of trypsin digestion vitellogenin protein fragments from mud crab (*Scylla serrata* Forsskal, 1775).

Peptide fragments	Amino acid sequences
1	VLASPTLHR
2	LYGPQYGQFQADFFAR
3	DLVLNDVYR
4	GLLGLYDNERANDR
5	VGGQSSQELQIEVDIPDKMEIIR
6	EADVEVNLK
7	LLSSVTHGK

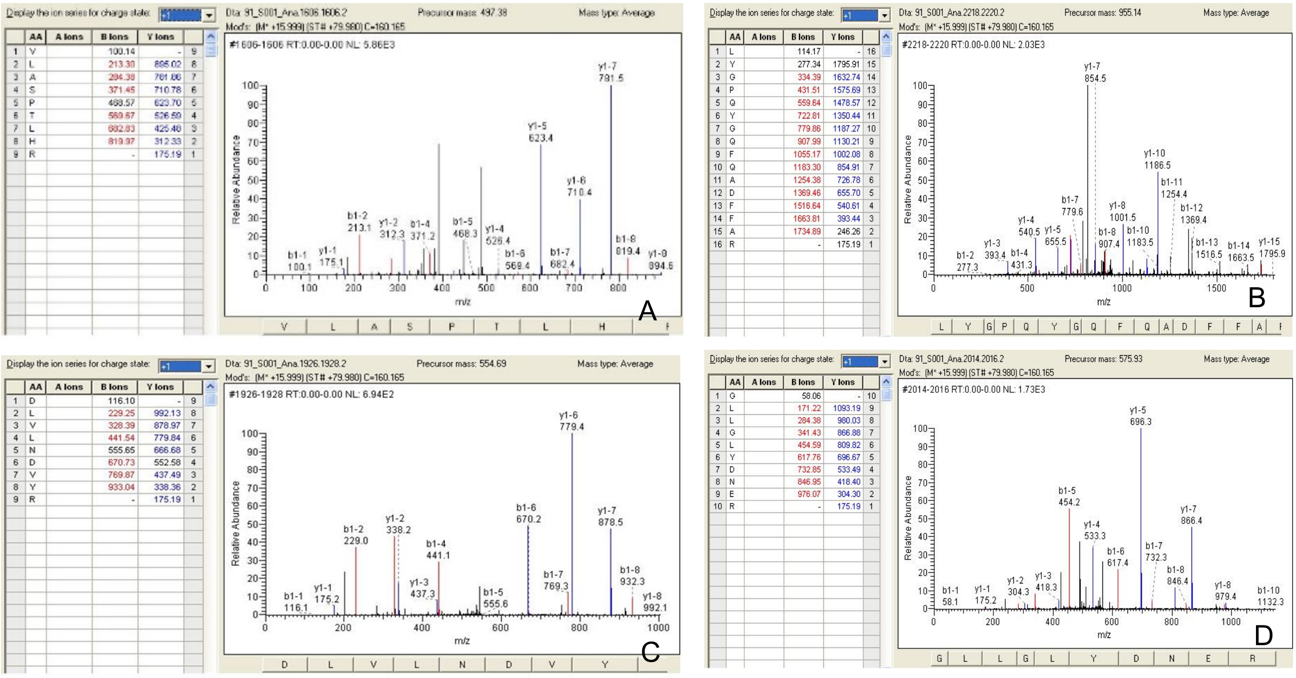


Figure 2 Mass spectrum of vitellogenin protein fragments of *S. serrata* (A) peptide fragment 1, (B) peptide fragment 2, (C) peptide fragment 3 and (D) peptide fragment 4.

MTTHTVLLLALAAAAAAAPYGSTIQLCSTECPVAAAKLAFTPGKTYSYTYTGKSQVQLKG 60

VDGGVVDTRWEEQVLLTVLGPCDLAISFKGSKVDGKTGLSGSDKLERYPLVVAMTDGRVQ 120

RVCSHPDDDTWAINMKKGVVSALQISLPSLSISNSGLNFTETDVLGTCPTYYEVQAEGAK 180

VLVKKEKNHRLCQEHYPTPDEIDLPHLKGPLPIQESQSICRQEIDSGIISSVVCEDKKVI 240

RPSYGMYKYVEAKQESTLRLTSSDVSAPDTISRIGQDELVPRSLRYDYETAKKDPSLVPE 300

LEQTLTYLCEITKDGVEADVAAHLSKAVHLMRRIPEQGFNEIYTKVHNKQICPQHSRLES 360

MYKDAIAFVHEPESVPVMVKELVEGRATGTLAALYSTGFYLVPRPDVKAIRALEPLFKSN 420

ADLSSAKLAAASMVNTYCRHKPHCYEESPVRNLAQALKQKIEEDLSSSSREETQKQALSA 480

LKSLGNMGVMTPETADKVILYMENENKKVSTRVAAAQAFRLTKCQRLVTQKLVQYALRPG 540

QNTEVRIAAYLAAVRCANYEDLQHIVTKISYEENTQVRGFILSHLINLQQSDAPGKQRLR 600

YLLTNILLPQDFETDIRKYSQNLDLSYFSPSAAGLESNMIYAPGSMLPRSLGVNLTAAPD 660

GTGIPINIADVGARVEGLEPIIAQLLGPASYLKTSSYSKIFNDLVSFIQQNWSTIKQELE 720

VAIRERRTVDDATIESIISK**LYGPQYGQFQADFFAR**FLGQEINYASLSEHLQDINMHHLV 780

EASVRCPMQMLSSLKNVNLDKVKAVQLGVDYSFPTIQGTPLKITSETMAVAGIKMETNLN 840

GLFSGQGGSESKLKILPSFSVETHGFIGYDAYISKSGLKMNTTVSSSNGVAIK**VGGQSSQ** 900

ELQIEVDIPDKMEIIRVHSETFLMKHHENTSQTTRSCQPSMQDIRIRRKSCFTALESVFG 960

IKMCYDVNVPDIFRANASTTGIPSTGYTHLNKTESTITGYKIAVRADTETQDKKYAAKVS 1020

VAGSSSPK**EADVEVNLK**RDRESYLAEVK**LLSSVTHGK**VRISLVNRPEQKSLQTDFSFMKD 1080

GVEFLQALRIEIKKTHTSYGMKYDMDVYWSPSNKISQESQIFTGLLKLDYMLPNMVMEIS 1140

AETKNILKQYILFSLQAVVDFKYYDGVPIPVQLRQFELTVAINSWMVTSFFRNSRASSQE 1200

VIILRVSSLLHQREMLINLQADLPLQGTPAVDFIQQLFIDAKIGQTEYKLQQRILYQETR 1260

GAISLQLTRESDNVKLLQIHVEKDAHEIKFLFWVQMLEYMAPIKVVASAVQQGQDYNAEA 1320

IIMYGQQTLVQLHGPVTYINSPTLAKVGANIKINNVYQFIYSFEFEENKQNLLLEIKKEA 1380

QVLLSFETYLKTPSSQGPSLQARITYQFLLDGSMEVFVSENVIHISTNTLWLPHSPSPRR 1440

VKAFLDINWSQKQAQMMVLWNADKDSSQKIALDVIIVPESGRPAEATLHVKLMLLNRAYH 1500

SNVKVVVPFLLQRHGERNSIQMEVETPEQKKWMLEVGVQQQESNAAKVDLTFKSVNNNNY 1560

RLTSDLQWQRLDGPLCFDAQTRITLISPQNKRSLFSMNAKHHYSPQQHIIHFTMEASTPS 1620

TQPPLKISFSLENKDYSYVTKLQSEVSSPETLFTWQLEIYPEGGIKHLENAIDLTAIRNV 1680

LKTLSSMVGLRGSSPLVTSAYQKRNAYGYRYTRSSSGTHSFIIEQPSRTVEAHATYSPSK 1740

MGIEFYRNRAESEAKYEMSGEYMDSMWGGNSRLQGRMSHPKLSRDMTAAVESTRSGSGHQ 1800

GSFELDVFPDTADKITGSLTSILRANNTIVIEANLFSRVLQVKPKVMMEVSWAAHTAAFN 1860

FTFQETPLSPESLKEYAKYDRISRNHAAVTFQLAGEGSSTMDVSGVIEPRNGPHCAGFAL 1920

LANARTSLLGNFAVNSTVCKPMFLEVVFKKQNSEKIYKAAIGKLFPYKAEISLAESDRYQ 1980

TWYKYISLIGIRLETPRRIKIASEYRENEMASLK**DLVLNDVYR**ITEAVLTWTDRVCNEIE 2040

RQARQKGVPFPTPQIHQLLQEISHDIGEIYLDLIYNDILYEWEALKQLLQGPTATFVKES 2100

IFQLLQSMAHMEREFAVYIMQQFKPAINKIIEAVKEVARWVQTGEEPEIVRRLVEDLERS 2160

AIYQIIQTHIIEPIKETYPQQYQATKEVVAKVIDTFRHDLLIMQHK**VLASPTLHR**IIRKI 2220

EDLSQPDTMRQTLEWWESQVVQSLVTIAPEPGVYHVGIQIPLYRPIYSLTQLVNMTMQSP 2280

PTLTQKILLSAESFRPIPVTKIMETYYDWVPRNLSTLPLSLNRSALGVSDTEILTFDGVL 2340

LRMPRSPCKVLLGPDGGSRYTWSRMLAHPVRCYCFWADVVPVYMSHPQPSQAPGVPLQGG 2400

STKAIMKPNMEVNVNGRPVHGRQTVGDVVVKVSPDRVALVSPILGVQFMKQEHVVMVNAS 2460

TWVFNHTR**GLLGLYDNERANDR**MMSNGRNASSLHDLVNSWQESPSCPTPSISPVDPTRVP 2520

LKERVLCDFLFFQMKPCMPVVSHKPFLQSCRIHSRPFEVAGSYHSLCRAQGVMFPLSLF 2579

Figure 3 Localization of amino acid sequence of vitellogenin protein fragments of *S. serrata*. The underline bold letters display the peptide fragments matched with homology reference sequence of *C. feriata*. The box displays the first cleavage site of *C. feriata*.

จากการเปรียบเทียบกับลำดับกรดอะมิโนของชิ้นส่วนโปรตีนทั้ง 7 ชิ้นส่วน กับลำดับกรดอะมิโนของโปรตีนไวเทลโลเจนิน ของปู 5 ชนิด ที่ได้จากฐานข้อมูล NCBI ได้แก่ *C. feriata* (accession number AAU93694.1), *S. paramamosain* (accession number ACO36035.1), *P. trituberculatus* (accession number AAX94762.1), *C. sapidus* (accession number ABC41925.1) และ *E. sinensis* (accesion number QBO55879.1) โดยใช้โปรแกรม clustalW2 (Figure 4) พบว่าลำดับกรดอะมิโนของชิ้นส่วนโปรตีนทั้ง 7 ชิ้นส่วนที่ได้จากปูทะเลนี้มีความเหมือนกับโปรตีนไวเทลโลเจนินที่ได้จากปู *C. feriata* มากที่สุด

Species	Fragment 1	Fragment 2	Fragment 3	Fragment 4
	Vitellogenin fragments			
S.serrata	VLASPTLHR	LYGPQYGQFQADFFAR	DLVLNDVYR	GLLGLYDNERANDR
C.feriata	VLASPTLHR	LYGPQYGQFQADFFAR	DLVLNDVYR	GLLGLYDNERANDR
S.paramamosain	VLASPTLHR	LYGPQYGQFQADFFAR	D**S**VLNDVYR	GLLGLYDNERANDR
P.trituberculatus	VLASPTL**S**R	LYGP**HY**G**K**FQADFFAR	DLVLNDVYR	GLLGLYD**H**ERANDR
C.sapidus	VLASPTLHR	LYGPQYG**E**FQADFFAR	DLVVNDVYR	G**I**LGLYDNERANDR
E.sinensis	**LW**ASPT**VRS**	LYGP**HS**G**PV**QAD**V**FAR	**LW**ASPT**VRS**	GLLG**S**YD**N**E**LS**NDR
	: ****:	****: * .***.***	: ****:	*:** **:* :***

Species	Fragment 5	Fragment 6	Fragment 7
	Vitellogenin fragments		
S.serrata	VGGQSSQELQIEVDIPDKMEIIR	EADVEVNLK	LLSSVTHGK
C.feriata	VGGQSSQELQIEVDIPDKMEIIR	EADVEVNLK	LLSSVTHGK
S.paramamosain	**S**---**C**SQELQIEVDIPDKMEIIR	EA**N**VEVNLK	LLSSVTHGK
P.trituberculatus	VGGQSSQE**V**QIEVD**L**P**K**KMEIIR	E**SN**VEVNLK	L**M**SS**L**THGK
C.sapidus	**I**GGQSSQ**DI**QIEVDIP**N**KMEIIR	EA**N**VEVNLK	L**V**S**P**VTHGK
E.sinensis	V**N**GG--**R**E**ME**IEVDIP**N**KMEII**Q**	EA**N**VEV**LQ**K	L**Q**S**A**V**YS**G**D**
	::::****:*.*****:	*::*** *	* * : *.

Figure 4 Multiple alignments of vitellogenin protein using 7 amino acid fragments of *C. serrata* and other 5 crabs vitellogenin protein using ClustalW2. The underline bold letters display the contrast amino acid.

สรุป

จากการวิเคราะห์กรดอะมิโนของแถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 90 kDa จากน้ำเลือดของปูทะเล *S. serrata* เพศเมียด้วยเครื่อง LC MS/MS พบว่ามีความเหมือนกับลำดับกรดอะมิโนของโปรตีนไวเทลโลเจนิน ในปู *C. feriatus* มากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

Bradford, M.M. 1967. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry** 72: 248-254.

Chen, J.S. and A.S. Raikhel. 1996. Subunit cleavage of mosquito pro-vitellogenin by subtilisin-like convertase. **PNAS** 93: 6186-6190.

Chen, L.O., H.B. Jiang, Z.L. Zhou, K. Lia, G.Y. Deng and Z.J. Liu. 2004. Purification of vitellin from the ovary of Chinese mitten-handed crab (*Eriocheir sinesis*) and development of antivitellin ELISA. **Comparative Biochemistry and Physiology** B138: 305-311.

Khalaila, I., J. Peter-katalimic, C. Redcliffe, C.M. Aflalo, E.D. Harvey, R.A. Dwek, P.M. Rudd and A. Sagi. 2004. Structural characterization of the N-glycan moiety and site of glycosylation in vitellogenin from the decapod crustacean *Cherax quadricarinatus*. **Glycobiology** 14: 767-774.

Laemmli, U.K. 1970. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. ***Nature*** 227 (5259): 680-685.

Mak, A.S., C.L. Choi, S.H. Tiu, J.H. Hui, J.G. He, S.S. Tobe and S.M. Chan. 2005. Vitellogenin in the red crab *Charybdis feriatus*: hepatopancreas-specific expression and famesoic acid stimulation of vitellogenin gene expression. **Molecular Reproduction and Development** 70: 288-300.

Pateraki, L.E and E. Stratakis. 2000. Synthesis and organization of vitellogenin and vitellin molecules from the land crab *Potamon potamios*. **Comparative Biochemistry and Physiology** B125; 53-61.

Tsukimura, B. 2001. Crustacean vitellogenesis: its role in oocyte development. **American Zoologist** 41: 465-476.

Tsukimura, B. and T. Subramoniam. 1992. Purification and characterization vitellogenin and lipovitellins of the san crab *Emerita asiatica*: molecular aspects of crab yolk proteins. **Molecular Reproduction and Development** 33: 16-26.

Yang, F., H.T. Xu, Z.M. Dai and W.J. Yang. 2005. Molecular characterization and expression analysis of vitellogenin in the marine crab *Portunus trituberculatus*. **Comparative Biochemistry and Physiology** B142: 456-464.

Zmora, N., J. Trant, S.M. Chan and J.S. Chung. 2007. Vitellogenin and its messenger RNA during ovarian development in the female blue crab, *Callinectes sapidus*: gene expression, synthesis, transport, and cleavage. **Biology of Reproduction** 77: 138-146.

ทรานสคริปโตมและการวิเคราะห์ยีนมิกโซไวรัสรีซิสแทนซ์ในปลากัดไทย *Betta splendens*

Transcriptome Analysis and Characterization of the Antiviral Myxovirus-Resistance (Mx) Gene of Siamese Fighting Fish *Betta splendens*

<u>วลัยพร เจริญทรัพย์ศรี</u>[1,2] พัชรี โยควิบูล[1,2] ปาริชาติ ชุมทอง[1,2] จันทร์ประภา อิ่มจงใจรัก[3] และ ปิติ อ่ำพายัพ[1,2*]

<u>Walaiporn Charoensapsri</u>[1,2], Patchari Yocawibun[1,2], Parichat Chumtong[1,2], Chanprapa Imjongjirak[3] and Piti Amparyup[1,2*]

บทคัดย่อ

ปลากัดไทย เป็นปลาสวยงามที่ได้รับความนิยมจากตลาดทั่วโลก งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาทรานสคริปโตมของปลากัดไทย *Betta splendens* จากการหาลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยเครื่อง Illumina พบว่าได้ทรานสคริปโตมขนาด 4.46 Gb ประกอบด้วย 71,775 unigenes จากการวิเคราะห์ทรานสคริปโตมโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลยีนในระบบภูมิคุ้มกันของปลาชนิดอื่นพบยีนต้านไวรัส *Bs*MxA ซึ่งมีความคล้ายกับโปรตีน Mx ที่มีรายงานในปลา *Anabas testudineus* มากที่สุด งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทรานสคริปโตมของปลากัดทั้งตัวและยีน *Bs*MxA เป็นครั้งแรกในปลากัดไทย ข้อมูลที่ได้จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาวิจัยปลากัดไทยในอนาคต

ABSTRACT

Siamese fighting fish is one of the popular ornamental fish in the global trade. This study aimed to generate a *de novo* transcriptome for healthy betta fish (*Betta splendens*). Illumina sequencing produced a total of 4.46 Gb clean reads, which were assembled into 71,775 unigenes. Transcriptome was further analyzed based on similarity searches with the known immune-related genes from several fish, and the antiviral *Bs*MxA gene was identified. *Bs*MxA exhibited highest sequence similarity to Mx protein of fish *Anabas testudineus*. This study provides the whole body transcriptome and data of *Bs*MxA gene for the first time in betta fish, which was essential for further research of betta fish in the near future.

Key words: Siamese fighting fish, transcriptome, immunity, Mx protein

* Corresponding author; e-mail address: piti.amp@biotec.or.th

[1]ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

[1]National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), Pathumthani 12120

[2]ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[2]Center of Excellence for Marine Biotechnology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

[3]ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[3]Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

คำนำ

ปลากัดไทย (Siamese fighting fish) เป็นสัตว์น้ำสวยงามที่มีเอกลักษณ์โดดเด่น และเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในตลาดต่างชาติ มีปริมาณการส่งออกต่อปีมากกว่า 20 ล้านตัว ด้วยมูลค่าการส่งออกในแต่ละปีสูงกว่าร้อยล้านบาท และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี สร้างงานและสร้างรายได้มหาศาลเข้าสู่ประเทศ โดยปลากัดไทย เป็นปลาน้ำจืดพื้นเมืองสกุล *Betta* พบได้ตามแหล่งน้ำธรรมชาติ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้พบประมาณ 55 ชนิด (Schindler and Schmidt, 2006) สำหรับประเทศไทยพบ 10 ชนิด (Monvises *et al.*, 2009) โดยชนิดที่นิยมเพาะเลี้ยงเพื่อส่งออกเป็นปลากัดสวยงาม คือ *Betta splendens* Regan, 1910 (การุณ , 2554) จุดเด่นของปลากัดไทย คือ ลักษณะของครีบลำตัวและครีบหางที่มีความหลากหลาย และสีสันที่สวยงามสะดุดตา โดยปัจจัยสำคัญที่ช่วยเสริมจุดเด่นของปลากัดคืออาหารที่ใช้เลี้ยง แต่ด้วยข้อจำกัดค่าใช้จ่ายของอาหารปลาที่มีราคาสูง ทำให้เกษตรกรมักเลือกใช้อาหารมีชีวิตที่หาได้จากแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป เช่น ไรแดง ไส้เดือนน้ำ และลูกน้ำ ซึ่งเป็นพาหะของเชื้อก่อโรค นำไปสู่ปัญหาโรคติดเชื้อในปลากัดและส่งผลทำให้ปลาตายเป็นจำนวนมาก ถึงแม้ความต้องการปลากัดสวยงามในตลาดโลกยังมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามข้อมูลความรู้พื้นฐานทางด้านอณูชีววิทยาของปลากัดซึ่งมีความสำคัญต่อการปรับปรุงและเพิ่มความต้านทานโรคในปลากัดสวยงามยังมีอย่างจำกัด

ระบบภูมิคุ้มแบบไม่จำเพาะที่มีมาแต่กำเนิด (Innate immunity) ซึ่งมีการควบคุมผ่านวิถีการส่งสัญญาณของอินเตอร์เฟียรอนมีบทบาทสำคัญในการต้านเชื้อไวรัสในปลาและสัตว์ที่มีกระดูกสันหลัง (Sadler and Williams, 2008; Zhang and Gui, 2012) มิกโซไวรัสรีซิสแทนซ์ (Myxovirus resistance; Mx) เป็นโมเลกุลต้านไวรัสที่ถูกกระตุ้นผ่านวิถีการส่งสัญญาณของอินเตอร์เฟียรอนและมีบทบาทสำคัญในการยับยั้งการจำลอง DNA (Replication) ของไวรัส (Haller and Kochs, 2002) โปรตีน Mx มีฤทธิ์ยับยั้งไวรัสได้ในช่วงกว้าง ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมพบว่าโปรตีน MxA (MX1) มีฤทธิ์ยับยั้ง Influenza A virus และ Thogoto virus โปรตีน MxB (MX2) มีฤทธิ์ยับยั้ง HIV-1 Vesicular stomatitis virus และ Hantaan virus (Haller *et al.*, 2015) สำหรับในปลาพบว่าโปรตีน Mx สามารถยับยั้งไวรัสได้หลายชนิด เช่น โปรตีน ASMx1 ของปลาแซลมอนแอตแลนติก *Salmo salar* มีฤทธิ์ยับยั้ง Infectious pancreatic necrosis virus และ Infectious salmon anaemia virus (Jensen and Robertsen, 2002; Kibenge *et al.*, 2005) โปรตีน JFMx ของปลาลิ้นหมา *Paralichthys olivaceus* มีฤทธิ์ยับยั้ง Hirame rhabdovirus และ Viral hemorrhagic septicemia virus (Caipang *et al.*, 2003) อย่างไรก็ตาม องค์ความรู้ของยีนทั้งหมดรวมทั้งยีนที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกันต้านเชื้อก่อโรคที่มีการแสดงออกในปลากัดไทยยังคงไม่แน่ชัดในปัจจุบัน ความก้าวหน้าของเทคนิคทางด้านอณูชีววิทยาช่วยให้การศึกษาทรานสคริปโตมสามารถทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาทรานสคริปโตมเพื่อวิเคราะห์ยีนทั้งหมดที่มีการแสดงออกในปลากัดไทยในสภาวะปกติ และใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ทรานสคริปโตมเพื่อค้นหายีนในระบบภูมิคุ้มกันโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลยีนในระบบภูมิคุ้มกันของปลาชนิดอื่น

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

เลี้ยงปลากัดไทย *Betta splendens* ในบ่อพักเป็นเวลา 2 สัปดาห์ก่อนทำการทดลอง ยืนยันชนิดของปลากัด *B. splendens* ด้วยการทำดีเอ็นเอบาร์โค้ดโดยตรวจลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน Cytochrome c oxidase

subunit I (COI) (Table 1) เตรียมตัวอย่างปลากัดสำหรับวิเคราะห์ทรานสคริปโตมโดยเก็บแช่แข็งปลากัดทั้งตัว จำนวน 3 ตัว ในไนโตรเจนเหลวจนกว่าจะนำไปสกัด RNA เตรียมตัวอย่างปลากัดสำหรับศึกษาการแสดงออกของยีนในแต่ละเนื้อเยื่อโดยแยกเก็บเนื้อเยื่อต่างๆ ได้แก่ ตับ ลำไส้ กล้ามเนื้อ ไต ม้าม และเหงือก จากปลากัด 5 ตัว แช่แข็งเนื้อเยื่อในไนโตรเจนเหลวจนกว่าจะนำไปสกัด RNA โดยดำเนินการวิจัยสอดคล้องกับจรรยาบรรณการใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ สภาวิจัยแห่งชาติ และได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการกำกับดูแลการเลี้ยงและใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ (รหัสโครงการ BT-Animal 46/2562)

การสกัด RNA การสร้างห้องสมุด cDNA และการหาลำดับนิวคลีโอไทด์

สกัด RNA จากตัวอย่างปลากัดโดยใช้ Tri Reagent (Molecular Research Center) กำจัด DNA ที่เจือปนโดยย่อยด้วยเอนไซม์ DNase I (Promega) สร้างห้องสมุด cDNA ตามวิธีของ Illumina และส่งตัวอย่างวิเคราะห์หาลำดับนิวคลีโอไทด์ของ RNA ทั้งหมดด้วยเครื่อง Illumina Hiseq 4000 (Illumina) กับบริษัท BGI, Inc. (ประเทศจีน)

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมทางไบโออินฟอร์เมติกส์

นำข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ได้จากเครื่อง Illumina Hiseq 4000 (Raw reads) มาผ่านขั้นตอนการตัดเบสคุณภาพต่ำและ Adaptor ออกด้วยซอฟต์แวร์จากบริษัท BGI, Inc. (ประเทศจีน) นำลำดับนิวคลีโอไทด์ในแต่ละชิ้นของเส้น DNA (Clean reads) มาประกอบเรียงกันใหม่เป็น transcripts และ unigenes ด้วยวิธี *de novo* assembly โดยใช้โปรแกรม Trinity และ Tgicl วิเคราะห์หน้าที่ของยีนโดยการ BLAST กับฐานข้อมูลต่างๆ ได้แก่ NCBI non-redundant protein sequence (NR) NCBI non-redundant nucleotide sequence (NT) Swiss-Prot protein family (Pfam) Gene ontology (GO) Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (KEGG) และ Cluster of Orthologous Groups of proteins (COG)

การค้นหาและวิเคราะห์ยีน *Bs*MxA

ค้นหาข้อมูลของยีน Mx ที่มีรายงานในปลาและสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น เพื่อนำมาสืบค้นหายีน BsMxA ในฐานข้อมูลทรานสคริปโตมของปลากัดไทย *B. splendens* วิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์และลำดับกรดอะมิโนของยีน *Bs*MxA ด้วยโปรแกรม ExPASy (https://www.expasy.org) ทำนายโดเมนที่มีความสำคัญของโปรตีนด้วยโปรแกรม SMART (http://smart.embl-heidelberg.de) ทำนายส่วนของเพปไทด์ส่งสัญญาณ (Signal peptide) ด้วยโปรแกรม SignalP 3.0 (http://www.cbs.dtu.dk/services/SignalP/) เปรียบเทียบความเหมือนกับยีนที่รายงานในฐานข้อมูล GenBank โดยใช้โปรแกรม BLASTP (https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi) และทำ Sequence alignment โดยใช้โปรแกรม Clustal Omega

การตรวจสอบการแสดงออกของยีน *Bs*MxA ด้วยเทคนิค Semi-quantitative RT-PCR

สกัด RNA จากตัวอย่างเนื้อเยื่อตับ ลำไส้ กล้ามเนื้อ ไต ม้าม และเหงือก ด้วย Tri Reagent (Molecular Research Center) กำจัด DNA ที่เจือปนโดยย่อยด้วยเอนไซม์ DNase I (Promega) สังเคราะห์ cDNA ด้วย

RevertAid First Strand cDNA Synthesis Kit (Thermo Scientific) ตรวจสอบการแสดงออกของยีนในเนื้อเยื่อต่างๆ ด้วยเทคนิค semi-quantitative RT-PCR โดยใช้ไพรเมอร์ที่มีความจำเพาะกับยีน *Bs*MxA (Table 1) และใช้ Beta-Actin เป็นยีนควบคุม วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ PCR ด้วยอะกาโรสเจลอิเลคโตรโฟรีซิส

Table 1 Nucleotide sequence of the primers used.

Primer	Sequence (5´-3´)
COI-VF2_t1	CAACCAACCACAAAGACATTGGCAC
COI-FR1d_t1	ACCTCAGGGTGTCCGAARAAYCARAA
BsMxF	GGAAAATGTTCCTGCACCTTGC
BsMxR	TTCTGTCACTCAGGCTGCTGCT
BsActinF	AGGCTGTGCTGTCCCTGTAT
BsActinR	GAAGGAGTAGCCACGCTCTG

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาทรานสคริปโตมของปลากัดไทย *B. splendens*

จากการศึกษาทรานสคริปโตมของปลากัดไทย *B. splendens* ด้วยเครื่อง Illumina Hiseq 4000 พบว่าได้ raw reads ขนาด 4.75 Gb หลังจากทำการ clean data และตัดเบสที่มีคุณภาพต่ำและ Adaptor ออกแล้วพบว่าได้ทรานสคริปโตมขนาด 4.46 Gb เมื่อนำข้อมูลแต่ละ read มาประกอบเข้าด้วยกันโดยวิธี *de novo* assembly ด้วยโปรแกรม Trinity ได้ transcript ทั้งหมด 92,890 transcripts เมื่อนำ transcripts มาทำการจัดรวมกลุ่มด้วยโปรแกรม TgicI พบว่าได้ยีนทั้งหมด 71,775 unigenes มีความยาวรวม 79.51 Mb Unigene มีความยาวเฉลี่ย 1,107 bp มีค่า N50 เท่ากับ 2,225 bp และมี GC content เท่ากับ 49.79% (Table 2)

Table 2 Summary of Illumina sequencing and *de novo* assembly of *Betta splendens* transcriptome.

Particulars	Numbers
No. of bases of raw reads (Gb)	4.75
No. of bases after processing (Gb)	4.46
Total transcripts	92,890
Total unigenes	71,775
Total length of unigenes (Mb)	79.51
Mean length of unigenes (bp)	1,107
N50 (bp)	2,225
GC content (%)	49.79

เมื่อวิเคราะห์หน้าที่ของยีน โดยนำ unigenes ทั้งหมดไป Blast กับฐานข้อมูล Nr Nt GO COG KEGG Swiss-Prot และ Interpro พบว่ามีความเหมือนกับยีนที่มีรายงานในแต่ละฐานข้อมูล เท่ากับ 63.14% 65.88% 6.28% 22.98% 52.52% 54.48% และ 49.28% ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์หน้าที่ของยีนใน pathway ต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล KEGG พบว่า 37,694 unigenes เป็นยีนที่อยู่ใน 44 pathway (Figure 1) โดย pathway ที่พบ unigenes มากที่สุด ได้แก่ Signal transduction รองลงมาคือ Cancers: Overview Global and overview maps Immune system และ Endocrine system โดยคิดเป็น 9.98% 5.42% 5.24% 4.42% และ 4.30% ของ unigenes ที่พบทั้งหมดในทรานสคริปโตมของปลากัด *B. splendens* ตามลำดับ

การศึกษาทรานสคริปโตมทำให้ทราบยีนทั้งหมดที่มีการแสดงออกภายในเซลล์สิ่งมีชีวิตที่สนใจ ในปลาสวยงามพบว่ามีรายงานการศึกษาทรานสคริปโตมในปลาหางนกยูง *Poecilia reticulata* ปลาอาโรวาน่า *Scleropages formosus* และปลาทอง *Carassius auratus*, red var. (Fraser *et al*., 2011; Shen *et al*., 2014; Zhang *et al*., 2017) สำหรับในปลากัดไทย *B. splendens* ถึงแม้จะมีรายงานข้อมูลจีโนม โดยจีโนมของปลากัดไทยมีขนาด 465.24 Mb (Fan *et al*., 2018) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจีโนมเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการระบุชนิดของยีนที่มีการแสดงออกจริงในปลากัดได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทรานสคริปโตมของปลากัด *B. splendens* ผลจากการทดลองทำให้ทราบชนิดของยีนทั้งหมดที่มีการแสดงออกในปลากัดภายใต้สภาวะปกติ ผลจากการวิเคราะห์ทรานสคริปโตมยังมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการค้นหายีนในระบบภูมิคุ้มกันของปลากัดในการทดลองต่อไป

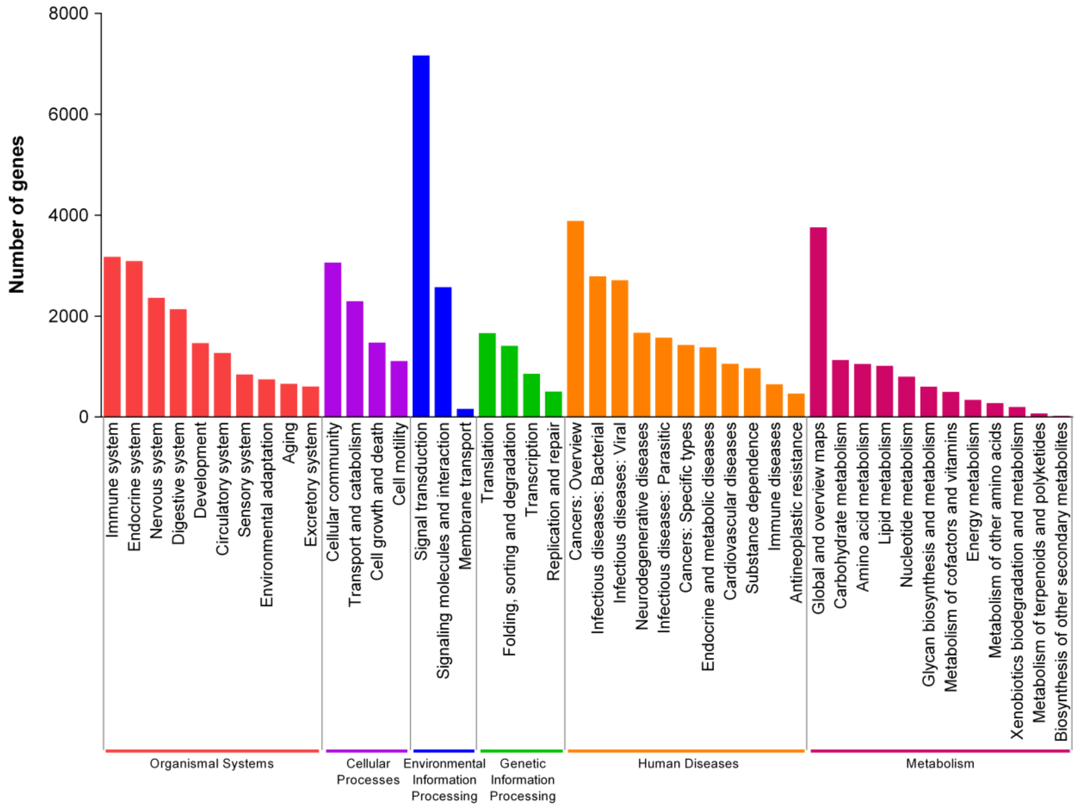


Figure 1 KEGG pathway enrichment analysis of from *Betta splendens* transcriptome. 37,694 unigenes were mapped onto 44 pathways of 6 main KEGG categories.

การค้นหาและศึกษาลักษณะสมบัติของยีนมิกโซไวรัสรีซิสแทนซ์ *Bs*MxA ในปลากัดไทย *B. splendens*

จากการค้นหายีนในระบบภูมิคุ้มกันจากทรานสคริปโตมของปลากัดไทย *B. splendens* พบยีน *Bs*MxA ซึ่งมี open reading frame (ORF) ที่สามารถแปลรหัสได้เป็นโปรตีนขนาด 623 กรดอะมิโน มีน้ำหนักโมเลกุล 71.05 kDa และค่า isoelectric point (pI) เท่ากับ 5.59 เมื่อเปรียบเทียบความเหมือนของ *Bs*MxA กับโปรตีนที่มีรายงานในฐานข้อมูล GenBank ด้วยโปรแกรม BlastP พบว่า *Bs*MxA คล้ายกับโปรตีน Mx ของปลาหมอ *Anabas testudineus* มากที่สุด (93%) รองลงมาคือโปรตีน Mx ของปลาสำลีน้ำลึก *Seriola dumerili* (92%) โปรตีน Mx2 ของปลา rock bream *Oplegnathus fasciatus* (91%) โปรตีน Mx ของปลาฮามาจิ *Seriola lalandi* (91%) โปรตีน Mx ของปลากะพงขาว *Lates calcarifer* (91%) และโปรตีน Mx3 ของปลากะพงแดง Sparus aurata (91%)

โปรตีน Mx จัดเป็นโปรตีนในกลุ่ม Dynamin-like large guanosine triphosphatases (GTPases) ประกอบด้วยโดเมนที่สำคัญ ได้แก่ GTPase domain Middle domain (MD) และ GTPase effector domain (GED) (Haller *et al*., 2015; Verhelst *et al*., 2013) จากการวิเคราะห์หาโดเมนที่สำคัญภายในโมเลกุลของ *Bs*MxA พบว่าประกอบด้วย GTPase domain บริเวณปลายอะมิโน และ GTPase effector domain (GED) บริเวณปลายคาร์บอกซิล (Figure 2) เมื่อวิเคราะห์ลำดับกรดอะมิโนภายใน GTPase domain พบว่าประกอบด้วย GTP-binding motif จำนวน 3 motif ได้แก่ GDXXSGKS (GDQSSGKS) บริเวณกรดอะมิโนตำแหน่งที่ 40-47 DLPG บริเวณกรดอะมิโนตำแหน่งที่ 141-144 และ TKPD บริเวณกรดอะมิโนตำแหน่งที่ 210-213 และพบ dynamin signature LPRXXGXXTR (LPRGSGIVTR) บริเวณกรดอะมิโนตำแหน่งที่ 58-67 โดย dynamin signature เป็นบริเวณที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จับได้กับ Mg^{2+} ซึ่งจำเป็นสำหรับการทำงานของเอนไซม์ในกลุ่ม GTPase (Song *et al*., 2004) นอกจากนี้ พบว่าภายในโปรตีน *Bs*MxA มี *N*-linked glycosylation (NAT) 1 ตำแหน่ง บริเวณกรดอะมิโนตำแหน่งที่ 534-536 ผลจากการวิเคราะห์ Sequence alignment (Figure 2) ยังแสดงให้เห็นว่าโปรตีน *Bs*MxA ของปลากัดมีความคล้ายกับโปรตีน Mx ที่มีการรายงานในปลา

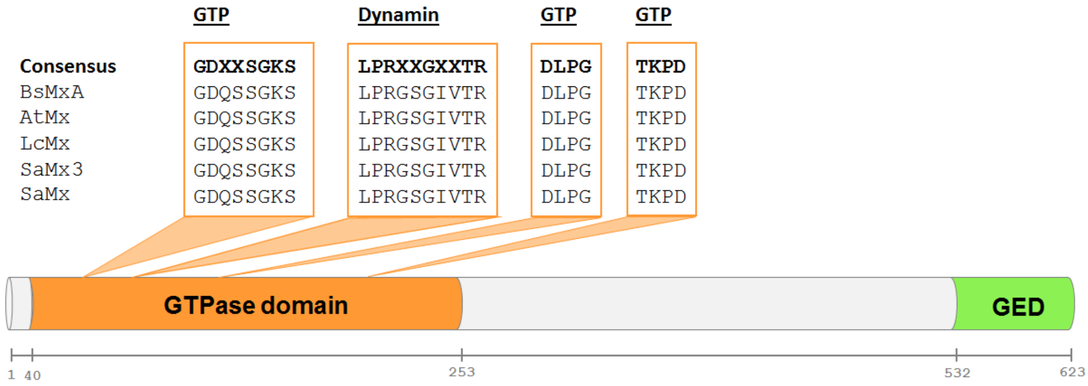


Figure 2 Domain organization of *Bs*MxA protein of *Betta splendens* and alignment of domains important for the antiviral activity with other fish Mx proteins.

การศึกษารูปแบบการแสดงออกของยีน *Bs*MxA ในปลากัดไทย *B. splendens*

จากการศึกษารูปแบบการแสดงออกของยีน *Bs*MxA ในเนื้อเยื่อต่าง ๆ ของปลากัดไทย *B. splendens* ด้วยเทคนิค semi-quantitative RT-PCR และตรวจสอบผลด้วยอะกาโรสเจลอิเลคโตรโฟรีซิส พบว่ายีน *Bs*MxA มีการแสดงออกมากที่สุดในกล้ามเนื้อ รองลงมา คือ เหงือก ม้าม ไต และ ลำไส้ ตามลำดับ (Figure 3)

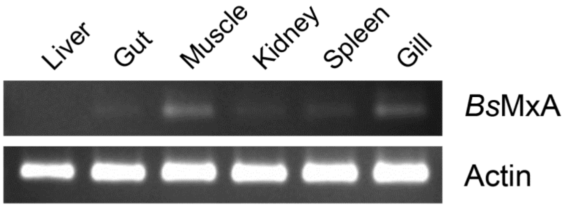


Figure 3 Tissue distribution analysis of *Bs*MxA gene in betta fish *Betta splendens*. The mRNA expression of *Bs*MxA was examined in the tissues of liver, gut, muscle, kidney, spleen and gill using semi-quantitative RT-PCR technique. Beta-actin was used as an internal control.

สรุป

งานวิจัยนี้ ประสบความสำเร็จในการศึกษาทรานสคริปโตมของปลากัดไทย *Betta splendens* ทั้งตัวในสภาวะปกติ โดยพบว่าได้ทรานสคริปโตมขนาด 4.46 Gb ประกอบด้วยยีนทั้งหมด 71,775 unigenes นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์ทรานสคริปโตมโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลยีนในระบบภูมิคุ้มกันของปลาชนิดอื่น ทำให้ค้นพบยีนมิกโซไวรัสรีซิสแทนซ์ *Bs*MxA ซึ่งมีความคล้ายกับ Mx protein ที่มีรายงานในปลาหลายชนิด ซึ่งข้อมูลที่ได้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาวิจัยปลากัดไทยในเชิงลึกในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สัญญาเลขที่ CU-GR_61_010_23_003)

เอกสารอ้างอิง

การุณ ทองประจุแก้ว. 2554. **การพัฒนาสูตรอาหารโดยใช้เทคโนโลยีของเอนไซม์ย่อยอาหารเพื่อการเจริญเติบโตอย่างมีคุณภาพของปลากัด (Betta splendens Regan, 1910)**. ดุษฎีนิพนธ์วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Caipang, C.M., I. Hirono and T. Aoki. 2003. In vitro inhibition of fish rhabdoviruses by Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus* Mx. **Virology** 317: 373-382.

Fan, G., J. Chan, K. Ma, B. Yang, H. Zhang, X. Yang, C. Shi, H. Chun-Hin Law, Z. Ren, Q. Xu, Q. Liu, J. Wang, W. Chen, L. Shao, D. Gonçalves, A. Ramos, S.D. Cardoso, M. Guo, J. Cai, X. Xu, J. Wang, H. Yang, X. Liu and Y. Wang. 2018. Chromosome-level reference genome of the Siamese fighting fish *Betta splendens*, a model species for the study of aggression. **Gigascience** 7: giy087.

Fraser, B.A., C.J. Weadick, I. Janowitz, F.H. Rodd and K.A. Hughes. 2011. Sequencing and characterization of the guppy (*Poecilia reticulata*) transcriptome. **BMC Genomics** 12: 202.

Haller, O. and G. Kochs. 2002. Interferon-induced mx proteins: dynamin-like GTPases with antiviral activity. **Traffic** 3: 710-717.

Haller, O., P. Staeheli, M. Schwemmle and G. Kochs. 2015. Mx GTPases: dynamin-like antiviral machines of innate immunity. **Trends in Microbiology** 23: 154-63.

Jensen, I. and B. Robertsen. 2002. Effect of double-stranded RNA and interferon on the antiviral activity of Atlantic salmon cells against infectious salmon anemia virus and infectious pancreatic necrosis virus. **Fish & Shellfish Immunology** 13: 221-241.

Kibenge, M.J., K. Munir and F.S. Kibenge. 2005. Constitutive expression of Atlantic salmon Mx1 protein in CHSE-214 cells confers resistance to infectious salmon anaemia virus. **Virology Journal** 2: 75.

Monvises, A., B. Nuangsaeng, N. Sriwattanarothai and B. Panijpan. 2009. The Siamese fighting fish: Well-known generally but little-known scientifically. **ScienceAsia** 35: 8-16.

Sadler, A.J. and B.R. Williams. 2008. Interferon-inducible antiviral effectors. **Nature Reviews Immunology** 8: 559-568.

Schindler, I. and J. Schmidt. 2006. Review of the mouthbrooding *Betta* (Teleostei, Osphronemidae) from Thailand, with descriptions of two new species. **Zeitschrift für Fischkunde** 8: 47-69.

Shen, X.Y., H.Y. Kwan, N.M. Thevasagayam, S.R. Prakki, I.S. Kuznetsova, S.Y. Ngoh, Z. Lim, F. Feng, A. Chang and L. Orbán. 2014. The first transcriptome and genetic linkage map for Asian arowana. **Molecular ecology resources** 14: 622-635.

Song, B.D., M. Leonard and S.L. Schmid. 2004. Dynamin GTPase domain mutants that differentially affect GTP binding, GTP hydrolysis, and clathrin-mediated endocytosis. **Journal of biological chemistry** 279: 40431-40436.

Verhelst, J., P. Hulpiau and X. Saelens. 2013. Mx proteins: antiviral gatekeepers that restrain the uninvited. **Microbiology and Molecular Biology Reviews** 77: 551-566.

Zhang, Y.B. and J.F. Gui. 2012. Molecular regulation of interferon antiviral response in fish. **Developmental & Comparative Immunology** 38: 193-202.

Zhang, Y., J. Liu, L. Peng, L. Ren, H. Zhang, L. Zou, W. Liu and Y. Xiao. 2017. Comparative transcriptome analysis of molecular mechanism underlying gray-to-red body color formation in red crucian carp (*Carassius auratus*, red var.). **Fish Physiology and Biochemistry** 43: 1387-1398.

Isolation and Characterization of Cartilage Stem/Progenitor Cells from Cartilage Tissue of Osteoarthritis Patients

Sarat Lertjintanakit[1], Tulyapruek Tawonsawatruk[2] and Patompon Wongtrakoongate[1*]

ABSTRACT

Osteoarthritis (OA) is a joint degenerative disease resulting from articular cartilage destruction. This disease often occurs in elderly people; however, it can be found at any age. Nowadays, there is no curative treatment for this disease. The current treatment only relieves pains and symptoms. Therefore, regenerative medicine such as stem cell therapy is an alternative technique to cure this disease. Many researches have been shown that there are tissue-resident stromal cells in many parts of human body, including cartilage tissue where OA occurs. The previous study showed that articular cartilage contains resident stem cells called cartilage stem/progenitor cells (CSPCs) which are similar to the mesenchymal stem cells (MSCs) properties. Thus, these cells might be key cells for chondrogenic differentiation which generates chondrocytes. This process produces cartilage which is an important component to recovery degraded cartilage from OA. However, the profile of CSPCs of Thai people has not been elucidated yet. This study aims to isolate and characterize the CSPCs from donors with OA under the International Society for Cellular Therapy (ISCT) guideline. The results show a plastic-adherent ability of these isolated cells in standard culture. The CSPCs also express a positive set of MSC surface markers including CD73, CD90, and CD105. Moreover, these isolated CSPCs can be induced to differentiate toward osteogenic, adipogenic, and chondrogenic lineage under specific differentiation conditions in vitro. Therefore, the isolated CSPCs from OA donors possess MSC properties following the ISCT definition. Hopefully, these CSPCs could be used as a cell model for studying OA progress. Moreover, this finding might provide a novel therapeutic approach for OA curative treatment.

Key words: Osteoarthritis, mesenchymal stem cell, chondrogenic differentiation, regenerative medicine

* Corresponding author; e-mail address: p.wongtrakoongate@gmail.com

[1]Department of Biochemistry, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok 10400

[2]Department of Orthopedic, Faculty of Medicine, Mahidol University, Ramathibodi Hospital, Bangkok 10400

INTRODUCTION

Osteoarthritis (OA) is a joint degenerative disease which characterized by a loss of articular cartilage at the ends of bones. This disease occurs when protective cartilage gradually degraded, subsequently results in bone erosion. OA often found in elderly people; however, it can also occur at any age. The primary causes of joint injury are mechanical injury, aging, and obesity. Both genetic and environmental factors can together damage cartilage and subsequently progress joint injury. Unfortunately, this disease still has no cure. The current treatments only relieve symptoms and recover joint functions, leading to another alternative technique for OA curative treatment. The modern technique is regenerative medicine.

Regenerative medicine is a medical technique based on replacing or regenerating cells to return cell/tissue functions. This technique has relied on the knowledge of stem cell fates which include self-renewal, differentiation, quiescence, and programmed cell death. Thus, to improve the regenerative medicine for curing OA patients, the understanding of how stem cells fate and its homeostasis controlled are important. Recently, the resident stem cells cartilage stem/progenitor cells (CSPCs) which have similar properties to mesenchymal stem cells (MSCs) were discovered in joint human as well as OA patients (Jiang and Taun, 2015). However, the profiling of CSPCs in Thai people with OA is still little.

Due to the properties of CSPCs are similar to the mesenchymal stem cell, the CSPCs are able to self-renew and multi-differentiate toward osteogenic, adipogenic and chondrogenic lineage. Many researches have shown that MSCs from a different source share similar features, including fibroblast morphology and cell surface markers, however their proliferation and differentiation capacities are different (Lianliang and Gang Li, 2017). Resulting in clinical application potential of different MSCs give different effectiveness depending on the aspect of user. Interesting, CSPCs might be effective cell to study the OA progress. Furthermore, these cells might be an appropriate cell source for curing OA as stem cell therapy. To use CSPCs as a cell model to study and succeed therapeutic approaches against OA in Thai people, it is important to characterize the CSPCs possessing MSCs following the International Society for Cellular Therapy (ISCT) guideline.

According to being MSCs of ISCT definition, the MSCs have to i) be a plastic adherent in standard culture condition, ii) express a positive MSC surface markers including CD73, CD90 and CD105, and iii) retain a multipotent phenotype with an ability to differentiate into trilineage including osteoblasts, adipocytes, and chondrocytes under standard differentiation condition in vitro. Therefore, this research aims to isolate and characterize CSPCs from the cartilage of OA patients possessing MSC-like properties. This finding might pave a way for improving the treatment of OA disease. Moreover, this study might support regenerative medicine and the use of stem cell therapy to degenerative diseases in Thai patients.

MATERIALS AND METHODS

1. Cell culture

Cartilage stem/progenitor cells (CSPCs) were collected from articular cartilage of knee joints which obtained from donors with Osteoarthritis (OA). OA tissue was obtained from patients at the time

of joint surgery. Donor consents and protocols are provided from the Ethic Committee, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University. Isolation and culture protocol were adapted from Alsalameh *et al*. (2004). Cartilage tissue was washed in PBS supplemented with 100 units/ml penicillin, 100 ug/ml streptomycin and incubated for 1 hour at 37°C, 5% CO_2 in serum-free DMEM. After enzymatic digestion overnight by applying 0.05% collagenase P in DMEM media supplemented with 5% FBS at 37°C, cells were selected by filtration through 50 um mesh sieves. Selected cells were grown in DMEM media supplemented with 10% FBS at 37°C in 5% CO_2. Subculturing was performed by 0.25 Trypsin/EDTA after cells growing 80-90% confluence, and media was replaced every 3 days

2. Adipogenic differentiation assay

Isolated CSPCs (P5-P10) from different individuals were seeded at a cell density of 5,000 cells/cm² into 24-well-plate, cells were incubated at 37°C, 5% CO_2 in DMEM/ low glucose media supplemented with 10% FBS. Cells were induced by replacing adipogenic differentiation media containing 50 nM Dexamethasone, 0.5 mM IBMX, 50 µM Indomethacin, and Insulin the next day. Cell culture was maintained in adipogenic differentiation media for 21 days, and the media was replaced every 3 days. After three weeks, lipid droplets of adipocytes were stained by Oil red O.

3. Osteogenic differentiation assay

CSPCs from articular cartilage of donors (P5-P10) were seeded into 24-well-plate and grown at 37°C, 5% CO_2 in DMEM/ low glucose media supplemented with 10% FBS. The next day, osteogenic differentiation media containing 10 nM Dexamethasone, 10 mM β-Glycerophosphate, and 50 µM L-Ascorbic acid 2-phosphate was replaced. Replacing osteogenic media were replaced twice a week and culture cell for 21 days. Calcium deposits of osteoblast were stained by Alizarin red.

4. Chondrogenic differentiation assay

Articular cartilage-derived CSPCs of individuals (P5-P10) were plated at $5x10^3$ cells/cm² cell density into 24-well-plate and maintained in DMEM/ low glucose media supplemented with 10% FBS. These MSCs were induced by replacing chondrogenic media (PromoCell, cat. no. C-28012) and incubated for 21-28 days. Chondrogenic media were replaced twice a week. Alcian blue was used to stain proteoglycan of extracellular matrix associated with chondrocytes.

5. Flow cytometry

After cells reached 80-90% confluence, cells were detached by applying 0.25 Trypsin/EDTA at 37°C, 5 min. Cells were counted and collected around 250,000 cells into a micro centrifuge tube. Cell suspension was resuspended by 10% FBS in PBS and incubated with 100 ul (1:100) of directly fluorophore -conjugated antibodies against CD73, CD90, and CD105 for 1 hour on ice. After incubation, cells were centrifuged at 300 x g for 5 min and resuspended by cold 10% FBS/PBS. Resuspended cells were analyzed under the FACScanto flow cytometer. Appropriate isotype control antibodies and unstained cells were used in all analysis.

RESULTS AND DISCUSSION

1. CSPCs Isolation

Cartilage tissues (n = 4) were obtained from men and women donors with Osteoarthritis progress in Orthopedic department, Ramathibodi Hospital, under the permission and Ethics committee. CSPCs were isolated and collected following Alsalameh's protocol. To study whether these isolated cells have an adherence and proliferation ability, these harvested cells were cultured in treated culture container, therefore, the adherent cells were grown in standard medium. After 1 week, the non-adherent cells were eliminated during medium replacement. These adherent cells have a fibroblast-like morphology (Figure1A) which are a key characterization of MSCs following ISCT, comparing to hBM-MSCs. Moreover, the CSPCs exhibit an ability to proliferate and be subcultured as increasing passage number in a standard culture medium. Thus, these isolated CSPCs show a plastic-adherent ability and fibroblastic-like appearance.

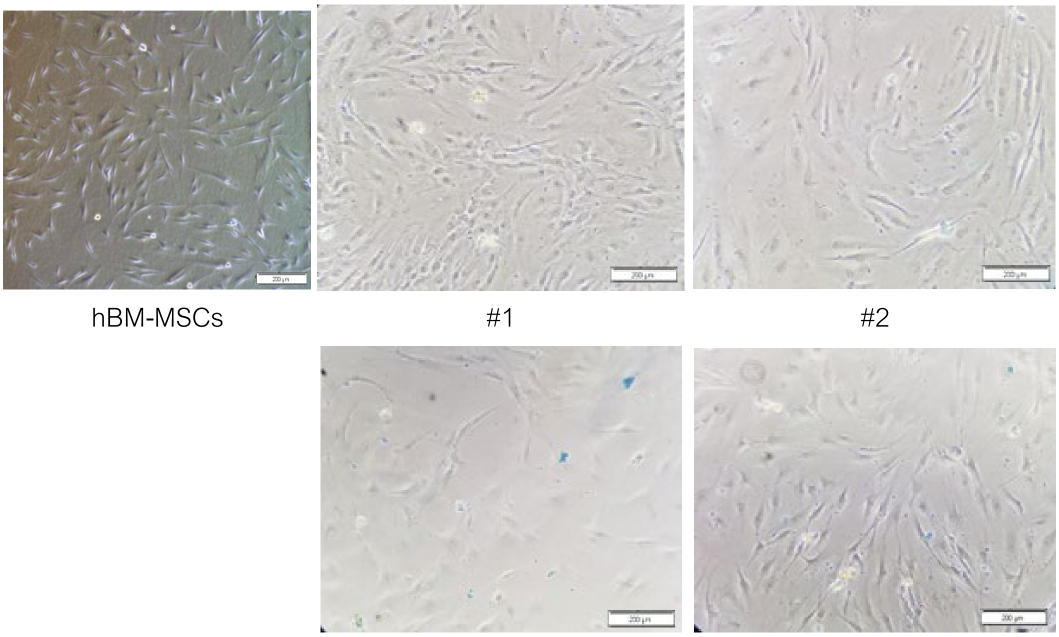


Figure 1 Microscopic images of hBM-MSCs and CSPCs. Cells were observed under an inverted microscope (scale bar, 200 µm).

2. MSC surface markers expression of isolated CSPCs

According to the describing of MSC identification, MSCs have to minimal express positive surface markers including CD73, CD90, and CD105. To determine whether isolated CSPCs from donors with OA possess a similar property to the MSC expressing a set of MSC surface markers, these isolated cells were performed and analyzed by flow cytometry analysis. The flow cytometry results show that isolated CSPCs (n = 4) are positive for CD73, CD90, and CD105 compared to hBM-MSCs which are well known MSCs for characterization (Figure 2). Therefore, these isolated CSCPs co-express minimal positive MSC surface markers CD73, CD90 and CD105.

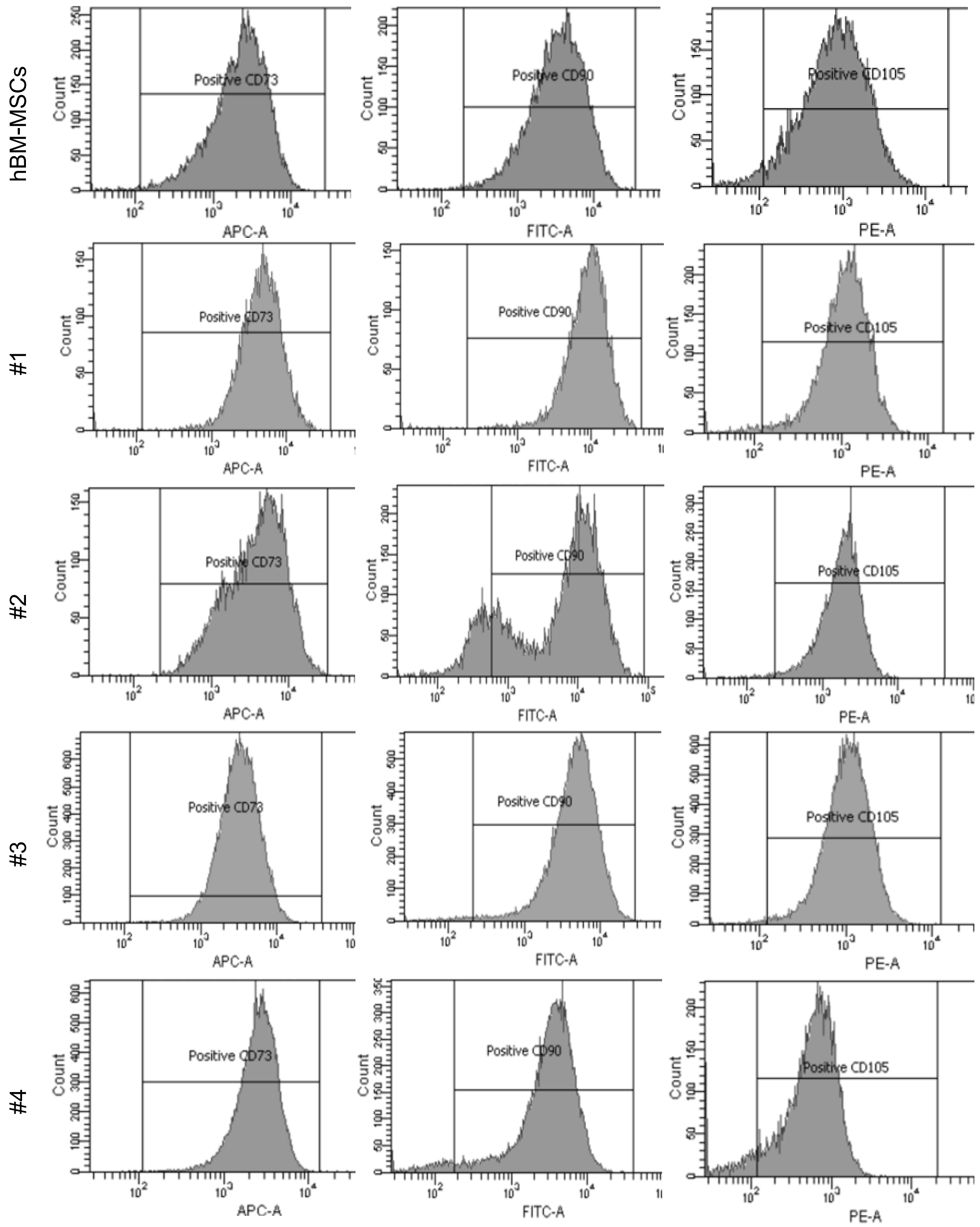


Figure 2 Flow cytometry analysis of isolated CSPCs from four donors and hBM-MSCs. Flow cytometry results show that CSPCs express a positive MSC surface markers CD73, CD90, and CD105. Positive surface markers of hBM-MSCs are shown in the top panel.

3. Multilineage differentiation potential of CSPCs

Due to MSCs are defined as multipotent stem cells which able to self-renew and differentiate to specific trilineage like osteoblast, adipocyte, and chondrocyte in vitro, these isolated cells (n = 4) have to be characterized the capable of differentiation toward osteogenic, adipogenic and chondrogenic lineage. To determine whether these isolated CSPCs have a MSC differentiation capability toward trilineage, osteogenic, adipogenic, and chondrogenic differentiation assay were

performed. The isolated CSPCs were induced to differentiate toward osteoblast, adipocyte, and chondrocyte under their specific differentiation conditions in monolayer culture for 21 days. Alizarin red staining shows the extracellular calcium deposit on the differentiated CSPCs but not significant observed in undifferentiated cells (Figure 3B). Lipid droplets were also stained by using Oil red O staining. The staining of differentiated cells shows more clearly of lipid droplets compared with undifferentiated cells (Figure 3C). Moreover, Alcian blue staining, which is a specific dye to stain proteoglycan associated extracellular matrix of chondrocytes, illustrates the ability of chondrogenic differentiation on these CSPCs (Figure 3D). Therefore, these isolated CSPCs from cartilage tissue have a MSC differentiation property that can be induced to differentiate toward osteogenic, adipogenic, and chondrogenic lineage *in vitro*

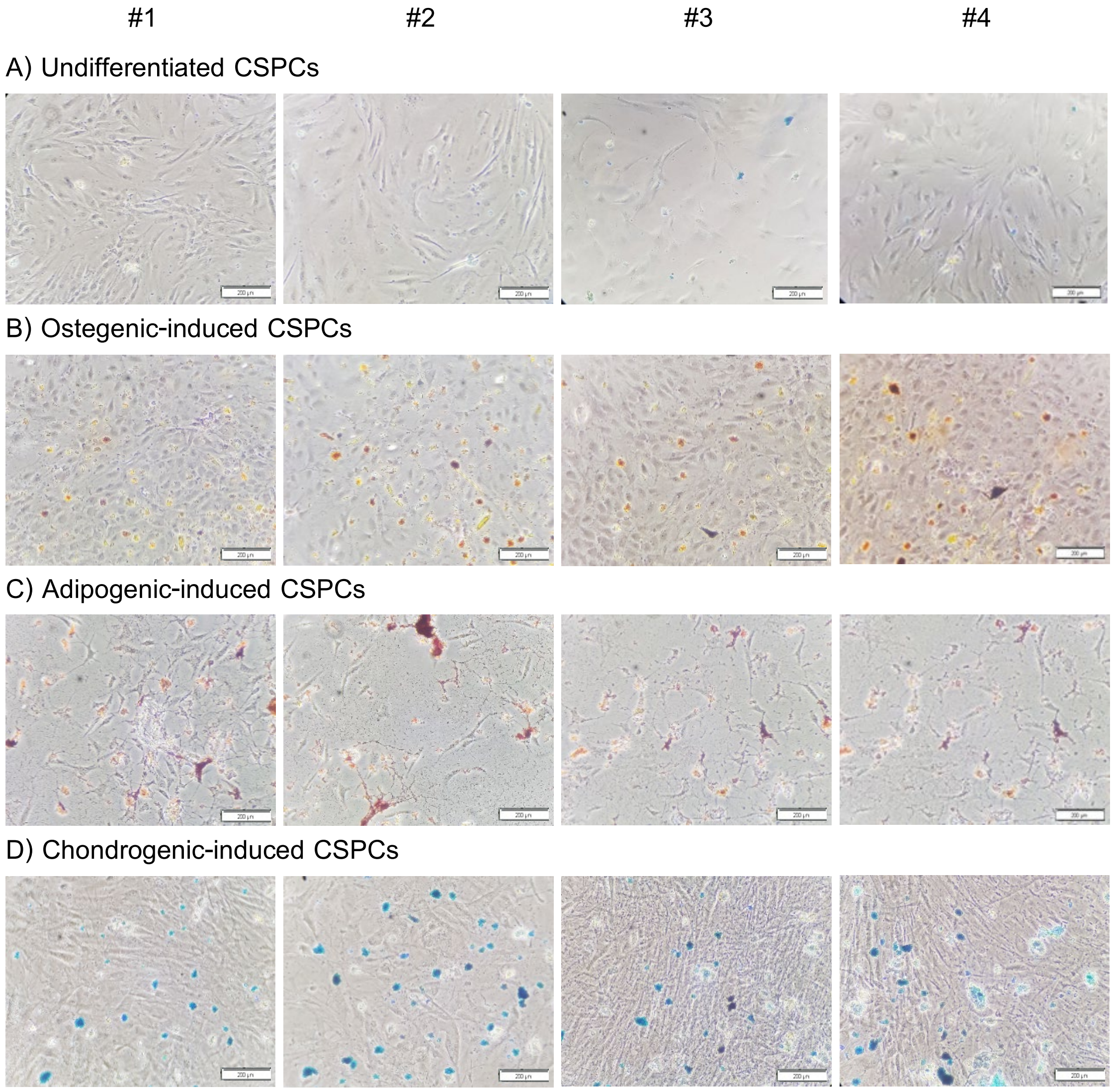


Figure 3 Isolated CSPCs were induced to differentiate toward multilineage. Undifferentiated and differentiated CSPCs were observed under an inverted microscope (scale bar, 200 μm).

CONCLUSION

The isolated CSPCs from cartilage tissue of OA donors (n = 4) can be plastic-adherent and grow in standard culture. From flow cytometry analysis, these CSPCs show phenotypic co-expression of CD73, CD90, and CD105. Furthermore, these isolated CSPCs can also be induced to differentiate toward osteogenic, adipogenic, and chondrogenic lineage under their appropriate medium in vitro. Thus, these isolated cells from cartilage tissue have mesenchymal stem cell properties due to being the ISCT definition. These CSPCs might be used as a cell model to study OA in human. Moreover, CSPCs or so-called cartilage-derived MSCs might be an appropriate stem cell source for autologous transplantation which is able to cure this disease.

ACKNOWLEDGEMENTS

There are so many people to thank for helping me during doing this work. First, I would like to thank Mr. Narongrit Srikae from the Department of Research, Ramatibodi Hospital for any experimental cell samples and good suggestions. I would like to thank Dr. Tulyapreuk Tawonsawatruk from the Faculty of Medicine, Ramathibodi Hospital for any suggestion and being committee. Moreover, I would like to thank LSE members for cheering and supporting different aspects of my work. I would also thank the Department of Biochemistry, Faculty of Science, Mahidol University and my scholarship SAST for all facilitating. Finally, my experimental work and project would have not been completed without the Dr. Patompon Wongtrakoongate who forces, gives a good suggestion, and supports me along working.

REFERENCES

Alsalameh, S., R. Amin, T. Gemba and M. Lotz. 2004. Identification of mesenchymal progenitor cells in normal and osteoarthritic human articular cartilage. **Arthritis and Rheumatism** 50 (5): 1522-1532.

Baksh, D., L. Song and R.S. Tuan. 2004. Adult mesenchymal stem cells: characterization, differentiation, and application in cell and gene therapy. **Journal of Cellular and Molecular Medicine** 8 (3): 301-316.

Jiang, Y. and R.S. Tuan. 2015. Origin and function of cartilage stem/progenitor cells in osteoarthritis. **Nature Reviews Rheumatology** 11 (4): 206.

Xu, L., Y. Liu, Y. Sun, B. Wang, Y. Xiong, W. Lin and G. Li. 2017. Tissue source determines the differentiation potentials of mesenchymal stem cells: a comparative study of human mesenchymal stem cells from bone marrow and adipose tissue. **Stem Cell Research and Therapy** 8 (1): 275.

A Comparison of Two Decontaminating Methods on DNA Content in Ancient Dog (*Canis familiaris*) Bones Excavated from Archaeological Sites in Thailand

Parin Nithijane[1], Passorn Wonnapinij[1] and Wunrada Surat[1*]

ABSTRACT

The limitation of ancient DNA (aDNA) studies is the quality and quantity of retained DNA inside the ancient specimens. However, next generation sequencing (NGS) has been applied to solve the aDNA limitation but exogenous DNA contamination is a main problem for aDNA studies. The contaminated DNA could interfere endogenous DNA amplification and sequencing process. Therefore, decontamination during sample preparation is very important method prior to DNA extraction, library preparation and sequencing. To prevent the contamination, bleach (sodium hypochlorite—NaOCl) treatment has been used to eliminate the exogenous DNA in many aDNA studies. Here, this study aimed to compare the efficiency of two decontaminating methods with and without bleach in sample preparation step using two ancient dog (*Canis familiaris*) bones excavated from archaeological sites in Thailand. NGS and DNA mapping analysis were used to determine the amount of endogenous and exogenous DNA. Our result showed that there were endogenous DNA of dog remains in both Ban Chiang (BC) and Pong Takhob (PTK) samples. Our analysis could classify exogenous DNA into bacterial, human and Archaea DNA. The content of endogenous and exogenous DNA between two treatments was not significantly different. Therefore, bleach treatment could be skipped in sample preparation. The further experiment to increase chance to recover endogenous DNA, the hybrid capture-based next generation sequencing should be applied after DNA library preparation. We expect to get more endogenous DNA of the ancient dog, that will be used to access the maternal lineage of ancient dog in Thailand.

Key words: ancient DNA (aDNA), mitochondrial DNA (mtDNA), DNA decontamination, bleach, next generation sequencing (NGS)

* Corresponding author; email address: fsciwrds@ku.ac.th

[1]Department of Genetics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Ancient DNA (aDNA) studies are beneficial research that could gain insights into the archaeology and evolutionary biology. However, the limitation of aDNA is the quality and quantity of DNA inside the ancient specimens. Only short DNA fragments, mostly not exceed than 500 base pairs (bp), have been preserved in ancient specimens and lots of them are usually belonging to mitochondrial DNA (mtDNA) (Knapp and Hofreeiter, 2010). The aDNA fragmentation due to post-mortem damage which the level of DNA damage depends on specimen preservative conditions leading to the DNA quality and quantity inside the ancient specimens excavated from tropical regions are often lower than those from dry and cold regions because the warm and moist climate raise to accelerated decay of organic matter presumably arising from microbial, hydrolytic and oxidative damage (Reed *et al.*, 2003; Schwarz *et al.*, 2009; Molak and Ho, 2011; Gutierrez-Garcia *et al.*, 2014). A recent aDNA study of ancient bovine specimens excavated in Thailand showed that the 157-bp mtDNA fragment could be amplified from 26 of 56 specimens while the 179-bp fragment could be amplified from only 2 specimens (Siripan *et al.*, 2019). The result indicated that DNA inside the ancient specimens in a tropical like Thailand has been extensively damaged. Hence, the use of PCR amplification and Sanger method for aDNA study could make us loss a lot of information, especially from nuclear DNA (nuDNA) which could obtain from the very short fragments. Therefore, another innovation, next generation sequencing (NGS), has been applied to solve the aDNA limitation since the first described in 2005 (Margulies *et al.*, 2005). The NGS was applied to the aDNA study of woolly mammoth and 13 million bp of nuclear genome have been reported (Poinar *et al.*, 2006).

Although NGS has gained DNA recovery from ancient remains, contaminated problem could not be solved. DNA contaminant could interfere amplification process which exogenous could be amplified. Moreover, the contaminant could reduce the number of endogenous DNA sequencing read. Hence, decontaminating process is very crucial for DNA studies. The sources of exogenous DNA usually come from surface contamination on ancient specimens. Many decontaminating methods have been used to eliminate contamination from bone or teeth surface, including washing the surface with sterile water, acid, ethanol, or bleach, removing the surface, exposing to UV light (Kemp and Smith, 2005).

Although the use of bleach for decontamination has been widely used in many aDNA studies, there are some reports showed that bleach could cause the destruction and loss of aDNA remains (Kemp and Smith, 2005; Korlevic *et al.*, 2015; Basler *et al.*, 2017). Therefore, the decontaminating method need to carefully select for aDNA studies, especially if the size of ancient specimens are small which bleach could penetrate into the whole specimen and might destroy almost all endogenous DNA. This study aimed to compare the efficiency of two decontaminating methods with and without bleach

in sample preparation step using two ancient dog bones excavated from archaeological sites in Thailand. NGS and DNA mapping analysis were used to determine the amount of endogenous and exogenous DNA.

MATERIALS AND METHODS

1. Archaeological remains

The animal remains were identified as dog bones by morphological analysis. A tibia (Figure 1A) excavated from Ban Chiang (BC) archaeological site, Nong Han district, Udon Thani Province was dated 4,000-2,800 year before present (YBP). A mandible (Figure 1B) excavated from Ban Pong Takhob (PTK) archaeological site, Wang Muang district, Saraburi Province and was dated 2,900 YBP.

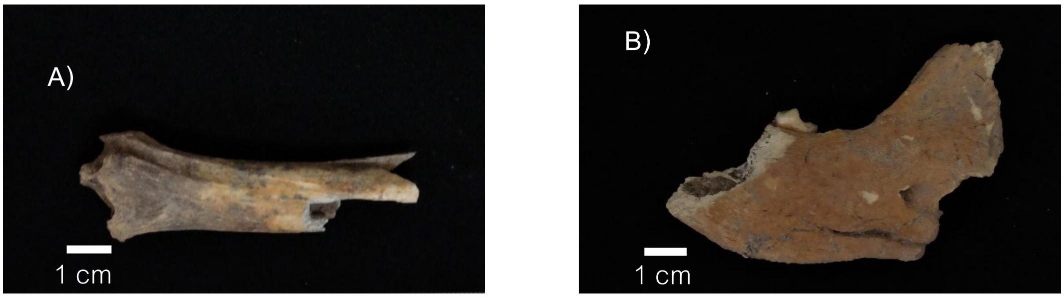


Figure 1 Dog remains A) Tibia (BC) and B) Mandible (PTK).

2. Sample decontamination and preparation

All procedures were carried out under sterile condition by cleaning with 70% ethanol, DNA decontaminants (DNA-ExitusPlus™) and exposed to UV light for hour.

2.1. sample preparation without bleach

The surface of samples was cleaned by 70% ethanol. Then remove the external surfaces using a sterile dentistry drill.

2.2. sample preparation with bleach

The surface of samples was cleaned by 70% ethanol, then immersion in 10 % bleach for 10 min, washing twice with sterile water, and then air dry with UV exposing on each side for 20 min. Then remove the external surfaces using a sterile dentistry drill.

Samples prepared by both methods were grinded into fine bone powder with a sterile mortar and pestle. The 0.25 mg of each bone powder was aliquot into 1.5 mL tubes, Then the sample prepared without bleach labelled as BC-1 and PTK-1 while bleach-treated samples were labeled as BC-2 and PTK-2.

3. DNA extraction and DNA quantification

DNA was extracted using a guanidine hydrochloride-based binding buffer and silica columns, as described previously (Dabney *et al.*, 2013). Throughout DNA extraction, blank extraction (no bone

powder) was processed alongside samples to provide as negative controls. The concentrations of all DNA extracts were determined by using a Qubit fluorometer (Invitrogen, Thermo Fisher Scientific, USA) and bioanalyzer.

4. Polymerase chain reaction (PCR) amplification

The set of primer was used to amplify the control region (CR) fragment. The 170-bp fragment was amplified by a forward primer (15648-15679) 5'-GTCCAATAAGGGCTTAATCACCATGCC-3' and a reverse primer (15820-15843) 5'-TCCATCGAGATGTCCCATTTGCGA-3' (Druzhkova *et al.*, 2013). The PCR was performed in a total volume of 25 µl containing 1X Q5 reaction buffer, 0.5 µl of each primer (0.5 µM), dNTPs (200 µM), rabbit serum albumin (20 mg/ml), 3 µl of aDNA and 1 U of Q5 high-fidelity DNA polymerase; cycling conditions were 98°C for 30 s; 40 cycles of 98°C for 10 s, 59.2°C for 30 s, and 72°C for 20 s; and 72°C for 2 min. Then, PCR products were examined on 2% agarose gel (Bio-Rad, USA).

5. Library preparation and sequencing

Length profiles of each sample were assessed using bioanalyzer assays prior to indexed adapter ligation. Then adapters were ligated with DNA fragments of each sample and bioanalyzer was used to reassess to length profiles prior to size selection. Shotgun metagenomic sequencing was performed on an Illumina NextSeq, using the QIAseq reagent kit (2 × 75 bp read length).

6. Sequence data analysis

Data analysis was performed on Galaxy (https://usegalaxy.org/) tools. Firstly, FastQC Read Quality reports tool was used to describe the overview such as total sequence reads, sequence length and GC content. Sequence reads were trimmed using Trimmomatic tool. Then trimmed reads were mapped against a dog reference genome (CanFam3.1) by using BWA-MEM tool. Then duplicate molecules in BAM datasets were located and filtered by MarkDuplicates tool and Filter tool, respectively. Taxonomic classification was used Kraken tools to assign taxonomic labels to sequencing. Finally, the descriptive information for a BAM dataset was performed on Samtools flagstat. The chi-squared (χ^2) statistic was used to test these data.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Ancient DNA recovery and Fragment size

From Qubit measurement, DNA concentration of BC-1, BC-2, PTK-1 and PTK-2 were 1706, 935.6, 6888 and 4,070 pg/uL, respectively. The untreated samples had higher DNA concentration than the treated ones, 1.82-fold and 1.69-fold for BC and PTK samples, respectively. From figure 2A, the

small DNA fragments (44-8795 bp) were detected only in PTK-2. BC-1 and BC-2 contained DNA fragments larger than 500 bp (700-8800 bp). No DNA fragment was detected by bioanalyzer in PTK-1. However, the result in figure 2B contributed that PTK-1 might contain endogenous DNA. The result showed that the amounts of the aDNA might be enough to be amplified. Hence, all samples were used for 170-bp amplification but no 170-bp PCR product was observed.

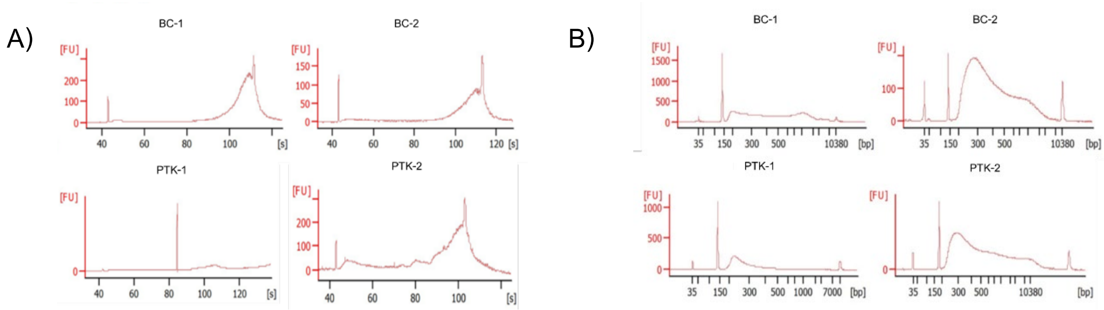


Figure 2 Size distribution of DNA fragment A) before index ligation B) after index ligation.

2. NGS analysis

The number of total sequence reads of the bleach-treated samples was higher than those of the untreated samples, 2.0 and 1.3 folds for BC and PTK samples, respectively (Table1). The highest and lowest number of mapped reads were obtained from PTK-2 and PTK-1, respectively. The results corresponded with the DNA concentration measured by bioanalyzer. The identity of dog sequences was deduced from mapped reads; 10.85%, 5.70%, 7.22% and 9.23% of total sequence reads of BC-1, BC-2, PTK-1, and PTK-2, respectively.

According to 5-10% endogenous content of all sample, only 4-30 reads were mapped to mtDNA of the dog (Figure 3) while the others were mapped to nuDNA (Table 1). The very low mtDNA mapped reads might be the reason why the CR fragment could not be amplified. Taxonomic classification showed the exogenous DNA belonged to bacteria, human and Archaea. The bleach treatment reduced human DNA but increased bacterial DNA. However, exogenous DNA among these samples were not significantly different.

Table 1 Profile of DNA mapping analysis.

Library	Total sequence reads	Mapped reads	Endogenous content[a] (%)	mtDNA/nuDNA (reads)	Exogenous DNA (%)		
					Bacteria	Human	Archaea
BC-1	30617252	2505050	10.85	4/2505050	2.94	1.30	0.15
BC-2	61199502	2945877	5.70	30/2945877	3.57	1.19	0.40
PTK-1	38197692	1646098	7.22	6/1646098	2.97	2.03	0.04
PTK-2	50649256	3986145	9.23	28/3986145	3.24	0.26	0.09

[a] Endogenous content was calculated as the quotient of successfully mapped reads and the total number of reads used for mapping (Basler *et al.*, 2017)

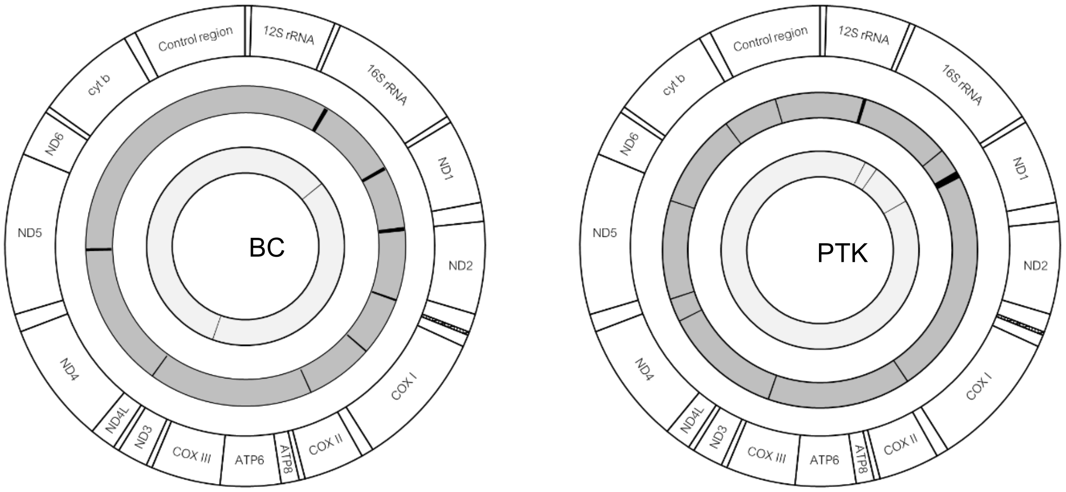


Figure 3 Mapped reads with dog mitochondrial DNA. Dog mitochondrial DNA consists of 13 open reading frames, 22 tRNA genes, 2 rRNA genes, and control region (D-loop) modified from Kim *et al.* (1998). The inner-, middle-, and outer rings were indicated to untreated samples, bleach-treated samples, and complete mitochondrial genome, respectively.

Our result showed that there were endogenous DNA remains in all ancient samples. The further experiment to increase chance to recover endogenous DNA, hybridization capture method will be used after DNA library preparation. We expect to obtain whole mitochondrial DNA of the ancient dog, the data will be used to access the maternal lineage of ancient dog in Thailand.

CONCLUSION

This is the first study to evaluate the DNA content in ancient specimens excavated in Thailand. The DNA concentration by Qubit measurement might be not accurate. Bioanalyzer should be applied for DNA quality and quantity measurement. The content of endogenous and exogenous DNA between two treatments was not significantly different. So, bleach treatment could be skipped in sample preparation. Finally, the hybrid capture based next generation sequencing should be applied with Thai ancient remains for the new insight in ancient DNA study in Thailand.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Dr. Prasit Auetrakulvit, Faculty of Archaeology, Silpakorn University, who identifying species the ancient specimens, Dr. Surapol Natapintu and The Fine Arts Department for providing dog remains applied in this study. Parin Nithijane was supported by Science Achievement

Scholarship of Thailand (SAST). Wunrada Surat was supported by Department of Genetics, Faculty of Science, Kasetsart University.

REFERENCES

Basler, N., G. Xenikoudakis, M.V. Westbury, L. Song, G. Sheng and A. Barlow. 2017. Reduction of the Contaminant Fraction of DNA Obtained from an Ancient Giant Panda Bone. **BMC Research Notes** 10 (1): 754-754.

Dabney, J., M. Knapp, I. Glocke, M.T. Gansauge, A. Weihmann, B. Nickel, C. Valdiosera, N. García, S. Pääbo, J.L. Arsuaga and M. Meyer. 2013. Complete Mitochondrial Genome Sequence of a Middle Pleistocene Cave Bear Reconstructed from Ultrashort DNA Fragments. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 110 (39): 15758.

Druzhkova, A.S., O. Thalmann, V.A. Trifonov, J.A. Leonard, N.V. Vorobieva, N.D. Ovodov, A.S. Graphodatsky and R.K. Wayne. 2013. Ancient DNA Analysis Affirms the Canid from Altai as a Primitive Dog. **PLoS One** 8 (3): e57754.

Gutierrez-Garcia, T.A., E. Vazquez-Dominguez, J. Arroyo-Cabrales, M. Kuch, J. Enk, C. King and H.N. Poinar. 2014. Ancient DNA and the Tropics: A Rodent's Tale. **Biol. Lett.** 10 (6): 20140224.

Kemp, B.M. and D.G. Smith. 2005. Use of Bleach to Eliminate Contaminating DNA from the Surface of Bones and Teeth. **Forensic. Sci. Int.** 154 (1): 53-61.

Kim, K.S., S.E. Lee, H.W. Jeong and J.H. Ha. 1998. The Complete Nucleotide Sequence of the Domestic Dog (Canis Familiaris) Mitochondrial Genome. **Molecular Phylogenetics and Evolution** 10 (2): 210-220.

Knapp, M. and M. Hofreiter. 2010. Next Generation Sequencing of Ancient DNA: Requirements, Strategies and Perspectives. **Genes.** 1 (2): 227-243.

Korlevic, P., T. Gerber, M.T. Gansauge, M. Hajdinjak, S. Nagel, A. Aximu-Petri and M. Meyer. 2015. Reducing Microbial and Human Contamination in DNA Extractions from Ancient Bones and Teeth. **Biotechniques** 59 (2): 87-93.

Margulies, M., M. Egholm, W.E. Altman, S. Attiya, J.S. Bader, L.A. Bemben and J.M. Rothberg. 2005. Genome Sequencing in Microfabricated High-Density Picolitre Reactors. **Nature.** 437 (7057): 376-380.

Molak, M. and S.Y. Ho. 2011. Evaluating the Impact of Post-Mortem Damage in Ancient DNA: A Theoretical Approach. **J. Mol. Evol.** 73 (3-4): 244-255.

Poinar, H.N., C. Schwarz, J. Qi, B. Shapiro, R.D.E. MacPhee, B. Buigues, A. Tikhonov, D.H. Huson, L.P. Tomsho, A. Auch, M. Rampp, W. Miller and S.C. Schuster. 2006. Metagenomics to Paleogenomics: Large-Scale Sequencing of Mammoth DNA. **Science** 311 (5759): 392.

Reed, F.A., Kontanis, E.J. Kennedy, K.A. and Aquadro, C.F. 2003. Brief communication: ancient DNA prospects from Sri Lankan highland dry caves support an emerging global pattern. **Am. J. Phys. Anthropol**. 121 (2): 112-116. doi:10.1002/ajpa.10211.

Schwarz, C., R. Debruyne, M. Kuch, E. McNally, H. Schwarcz, A.D. Aubrey, J. Bada and H. Poinar. 2009. New Insights from Old Bones: DNA Preservation and Degradation in Permafrost Preserved Mammoth Remains. **Nucleic Acids research** 37 (10): 3215-3229.

Siripan, S., P. Wonnapinij, P. Auetrakulvit, N. Wangthongchaicharoen and W. Surat. 2019. Origin of Prehistoric Cattle Excavated from Four Archaeological Sites in Central and Northeastern Thailand. **Mitochondrial DNA Part A** 30 (4): 609-617.

Preparation and Characterization of n-CdS/p-SnS Heterojunction Thin Film Diode

Parichat Cummon[1], Ngamnit Wongcharoen[1] and Thitinai Gaewdang[1]

ABSTRACT

This paper presents the preparation and characterization of n-CdS/p-SnS heterojunction thin film diode. Cadmium sulfide (CdS) thin film layer was deposited by chemical bath deposition (CBD) onto Fluorine doped Tin Oxide (FTO) thin film layer covered on slide glass then Tin sulfide (SnS) thin film layer was coated by vacuum thermal evaporation method. From Current-Voltage characteristics of the device showed a rectifying. behavior with a rectification ratio of 50 at the bias voltage of ±1.0V. The junction barrier height, ideality factor and series resistance values of the obtained diode evaluated by using thermionic emission (TE), Chung's and Norde's methods are 0.57, 3.02 and 83.43Ω at 300K, respectively. It was found that, at forward bias between 0.1 and 0.35 V, the conduction mechanism of the diode is dominated by TE mechanism. At bias voltage above 0.35V, the electrical transport is due to space charge limited current (SCLC) controlled by exponential trap distribution in the band gap of CdS. The junction barrier height, ideality factor and series resistance were found to be strong temperature dependence. The temperature dependence of the saturation current and ideality factor are well described by tunneling enhanced recombination mode at junction interface with activation energy and characteristic tunneling energy as E_a = 1.92 eV and E_{00} = 83.0 meV, respectively. The built-in voltage (V_{bi}) of 0.53V and free carrier concentration of 6.63×10^{14} cm^{-3} at room temperature were determined from Capacitance-Voltage measurements at 500 kHz.

Key words: n-CdS/p-SnS heterojunction, Current-Voltage characteristics, thermionic emission, Capacitance-Voltage characteristics

* Corresponding author; e-mail address: 61605080@kmitl.ac.th

[1]Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

INTRODUCTION

Tin monosulfide (SnS) is a promising candidate solar cell absorber material due to its absorption coefficient of 10^5 cm^{-1} and optical direct band gap of about 1.3eV The high natural abundance of tin and sulfur could potentially enable scaling to megawatt levels (Hartman *et al.*, 2011). For photovoltaic application, p-type SnS being the absorber material requires an n-type wide band gap transparent semiconductor as the heterojunction partner. Essentially, among all known transparent semiconductor materials, non-stoichiometric or doped oxides and sulfides such as ZnO, SnO_2, ZnS, $Cd_{1-x}Zn_xS$ and CdS, the n-CdS may be the best choice for p-SnS material as a heterojunction partner. The performance of such heterojunction depends on the structural, optical and electrical properties of each material thin film layer.

SnS thin films have been deposited by various methods such as chemical bath deposition, spray pyrolysis, electrodeposition, electron beam deposition, sputtering and thermal evaporation (Selim *et al.*, 2013). Among these methods, thermal evaporation technique is proposed low consumed material, high growth rate, ease to control stoichiometric composition and ease to extend to large scale production. Good quality of SnS thin films obtained by thermal evaporation technique was previously reported (Wongcharoen and Gaewdang, 2017). It is well-known that, CdS layer obtained by chemical bath deposition (CBD) is a rather simple, low-cost and close to room temperature method that provides reproducibility, uniform and adherent films. In this work, we used vacuum thermal evaporation method for the deposition of SnS films and chemical bath deposition for CdS films with the goal of fabrication n-CdS/p-SnS heterojunction diode. The electrical properties of n-CdS/p-SnS heterojunction were investigated by I-V and C-V characteristics and the electronics parameters controlling the heterojunction, such as barrier height, ideality factor (n), and series resistance (R_S) were obtained by combining the Cheung's function with conventional thermionic emission and modified Norde's function.

MATERIALS AND METHODS

CdS thin film was deposited on a fluorine doped tin oxide (FTO) substrate by the chemical bath deposition (CBD) method. The starting materials were cadmium sulfate (0.01M) as a Cd^+ ion source, thiourea (0.05M) as an S^{2-} ion source and ammonia (1.5M). They were mixed in deionized water with total volume 150 ml. The solution sets were then placed in a CBD setup. The temperature of chemical bath was adjusted and fixed at 80 ˚C with hot plate and temperature controller. The pH value of working solution was about 11.4 and deposition time is chosen to be 60 min. Finally, deposition process, the substrate were removed from chemical bath, rinsed in deionized water under ultrasonic condition for 10 min and finally dried by nitrogen gas. SnS layer was then deposited onto the CBD-CdS films by vacuum thermal evaporation method. The pressure during the deposition was maintained at $5x10^{-5}$ mbar with a turbo-molecular pumps system. The source and substrate separation distance was 17 cm.

The evaporation power was about 6.6 kW and deposition time was 30 mins. The substrate temperature was kept at 100˚C during the growth procedure. After that, the films were baked in vacuum at 100˚C for 30 mins. Silver electrodes were used as electrical contact on SnS and on FTO substrate.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Electrical properties of thin films

The conductivity type in the CdS and SnS films was determined by the Hall measurement. CdS films exhibited n-type conductivity, the carrier concentration of 9.91x10^{14} cm^{-3}.In contrast, SnS films exhibited p-type conductivity, the hole concentration of 5.92x10^{16} cm^{-3}.

Heterojunction properties of CdS/SnS films

1. Current-voltage characteristics

The forward and reverse bias I-V characteristics of n-CdS/p-SnS heterojunction at room temperature are given Figure 1. As can be observed, The I-V characteristics of the device demonstrate a rectifying behavior. According to the thermionic emission theory, the I-V characteristics of a diode is given by the following equation (Gullu *et al.*, 2017)

$$I = I_S\left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] \tag{1}$$

where V, n, q, k, and T are the applied bias voltage, the ideality factor, the electrical charge, the Boltzmann constant and the temperature in Kelvin, respectively. I_s is the reverse saturation current extracted from the straight-line intercept of the lnI-V plot at zero bias (shown in Figure 2.) and given as

$$I_S = AA^{*}T^2 \exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right) \tag{2}$$

where A is the contact area, A* is the effective Richardson constant (19.8 Acm^{-2} K^{-2} for CdS) and ϕ_B is the barrier height at zero bias. The ideality factor (n) from Equation (1) can be re-written as:

$$\phi_b = \left(\frac{kT}{q}\right)\ln\left(\frac{AA^{*}T^2}{I_s}\right) \tag{3}$$

and

$$n = \frac{q}{kT}\frac{dV}{d(\ln I)} \tag{4}$$

The ideality factor determined from the slope of the linear region of the forward bias shown in Figure 2. lnI-V plot and the relation in Equation (3). The value of the ideality factor and barrier height ϕ_B of the CdS/SnS Schottky diode was 3.02 and 0.57 eV at room temperature respectively. Figure 3 shows the forward bias logarithmic I-V characteristics for n-CdS/p-SnS heterojunction at room temperature. The graph is divided into four regions showing space charge limited conduction with two-level traps. In

Figure 3., region I at low voltage (<0.1V) was slope m~1 corresponds to the ohmic conduction case, region II (0.1<V<0.35) was non-linear represents the thermionic emission (TE) mechanism, while other region (>0.35V) was slope m>>1 case is suggested a space charge limited current conduction (SCLC) mechanism occurring in the device. One can have the information about SCLC mechanism more than two regions of the behavior conduction mechanism can be seen in Ref.

The Schottky diode factors such as the ϕ_B , n and R_s were also determined using Chung's technique. From Equation (1), following (Gullu *et al.*, 2017):

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + \frac{nkT}{q} \tag{5}$$

Figure 4 shows the graph between dV/dlnI versus I at room temperature a straight line. The value of R_s obtained from the slope of the graph is 83.43Ω at 300 K. To obtain ϕ_B , Cheung's technique defined another function which is

$$H(I) = V + \frac{nkT}{q}\ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) = IR_s + n\phi_{BO} \tag{6}$$

Figure 5 shows a plot of H(I) versus I at room temperature. The graph between H(I) versus I is a straight line with the y-axis intercept equal to $n\phi_{BO}$. The slope of this plot also provides a second determination of R_s that can be used to check the consistency of Cheung's technique. The values of R_s and ϕ_B were also obtained from H(I)-I plots is 83.43Ω and 0.60 eV at 300 K, respectively. Norde's technique is an alternative method to calculate the series resistance and barrier height. The following function has been derived in the modified Norde's technique:

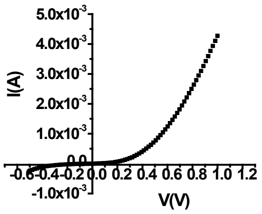
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta}\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \tag{7}$$

where γ is the integer (dimensionless) greater than n, β is a temperature-dependent value calculated with $\beta = q/kT$ and I(V) is the current obtained from the forward bias I-V curve. Once the minimum of the F versus V plot is determined, the value of barrier high can be obtained from Equation (8)

$$\phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \tag{8}$$

where $F(V_0)$ is the minimum value of *F(V)*, and V_0 is the corresponding voltage. From Nord's functions, R_s value can be determined as:

$$R_S = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_0} \tag{9}$$



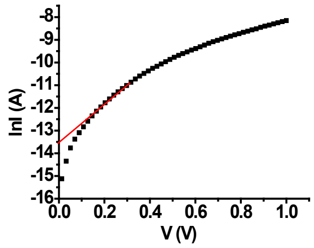
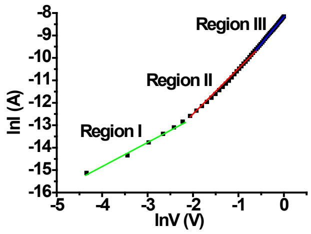


Figure 1 I-V plot for n-CdS /p-SnS diode at 300 K.

Figure 2 lnI-V plot for n-CdS /p-SnS diode at 300K.



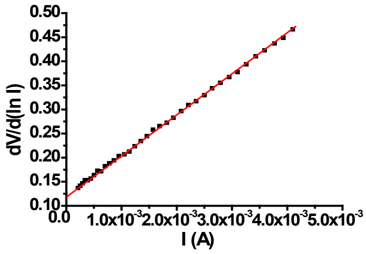
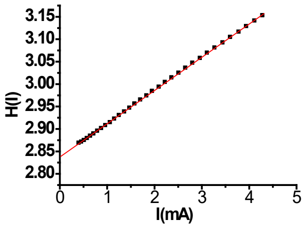


Figure 3 lnI-lnV plot for n-CdS /p-SnS diode at 300 K.

Figure 4 dV/dlnI-I plot for n-CdS /p-SnS diode at 300 K.



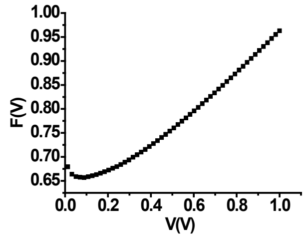
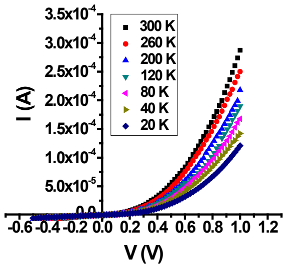


Figure 5 H(I)-I plot for n-CdS /p-SnS diode at 300 K.

Figure 6 F(V)-V plot for n-CdS /p-SnS diode at 300 K.



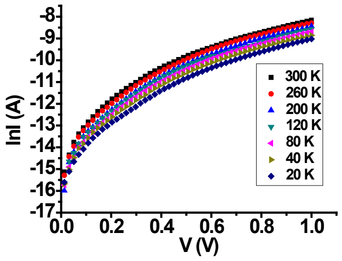
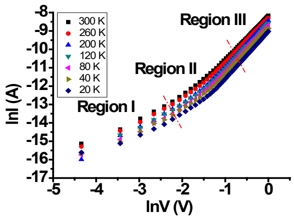


Figure 7 I-V plot for n-CdS /p-SnS diode at different temperatures.

Figure 8 lnI-V plot for n-CdS /p-SnS diode different temperatures.



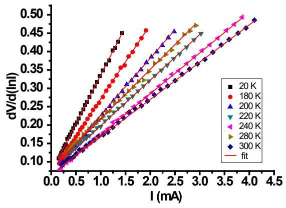


Figure 9 lnI-lnV plot for n-CdS /p-SnS diode at different temperatures.

Figure 10 dV/d(lnI)-I plot for n-CdS /p-SnS diode at different.

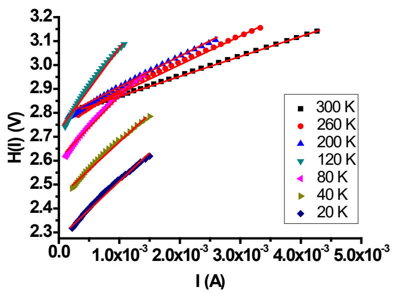


Figure 11 H(I)-I plot for n-CdS /p-SnS diode at different temperatures.

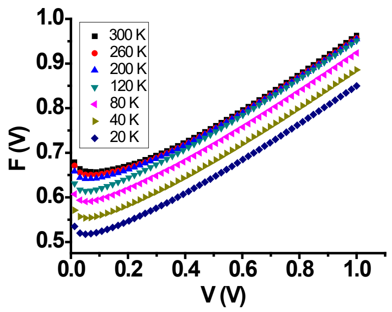


Figure 12 F(V)-V plot for n-CdS /p-SnS diode at different temperatures.

A plot of F(V) versus V at room temperature is shown in Figure 6. The values of ϕ_B and R_S from the plot F(V) vs. V is 0.68 eV and $1.07 k\Omega$, respectively. The I-V, lnI-V, lnI-lnV, dV/dlnI-I, H(I)-I and F(V)-V at different temperatures for n-CdS /p-SnS heterojunction are shown in Figure 7, 8, 9, 10, 11 and 12, respectively. The values of n, ϕ_B and R_S were then obtained and results present in Table 1. As can be seen table, the values of n obtained from I-V and dV/dlnI-I plot, ϕ_B obtained by I-V, H(I)-I and F(V)-V plot and R_S obtained from H(I)-I, dV/dlnI-I and F(V)-V plots are in good agreement with each other. The calculated value of R_s increase with the decrease of temperature. This can be attributed to the effect of the bulk resistance, interface state and voltage drop across interfacial layers at different temperatures.

Table 1 Values of ϕ_B , n, R_S measured at different temperatures.

Temperature (K)	Saturation Current, I_s (A)	Ideality Factor, n		Barrier Height, ϕ_B (eV)			Series Resistance, R_S (kΩ)		
		TE	Cheung	TE	Cheung	Norde	Cheung	Cheung	Norde
		I-V	dV/d(lnI)-I	I-V	H(I)-I	F(V)-V	H(I)-I	dV/d(lnI)-I	F(V)-V
300	4.76×10^{-6}	3.02	4.62	0.57	0.60	0.68	0.08	0.08	0.01
280	4.89×10^{-6}	3.31	5.58	0.52	0.50	0.67	0.09	0.08	0.13
260	4.34×10^{-6}	3.50	5.14	0.48	0.53	0.66	0.09	0.09	0.15
240	4.46×10^{-6}	3.99	6.24	0.44	0.44	0.65	0.11	0.10	0.43
220	4.80×10^{-6}	4.67	6.73	0.40	0.41	0.65	0.12	0.10	0.50
200	4.65×10^{-6}	5.23	6.82	0.36	0.40	0.64	0.13	0.13	0.52
180	4.89×10^{-6}	6.27	7.61	0.32	0.36	0.64	0.17	0.16	0.70
160	5.35×10^{-6}	7.87	9.10	0.28	0.30	0.63	0.23	0.21	0.75
140	4.76×10^{-6}	9.19	10.09	0.24	0.27	0.62	0.23	0.21	1.07
120	4.93×10^{-6}	10.94	11.76	0.20	0.23	0.61	0.24	0.22	1.31
100	4.78×10^{-6}	12.48	14.27	0.17	0.18	0.60	0.24	0.22	1.56
80	4.95×10^{-6}	15.36	18.04	0.13	0.14	0.59	0.26	0.23	1.89
60	4.35×10^{-6}	18.85	24.11	0.09	0.10	0.57	0.30	0.26	2.11
40	5.06×10^{-8}	30.64	36.43	0.06	0.06	0.55	0.31	0.28	2.18
20	5.28×10^{-8}	62.82	71.13	0.02	0.03	0.51	0.35	0.30	9.09

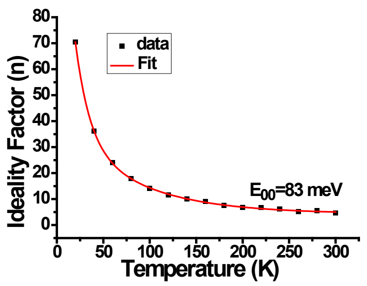


Figure 13 n-T plot for n-CdS /p-SnS diode.

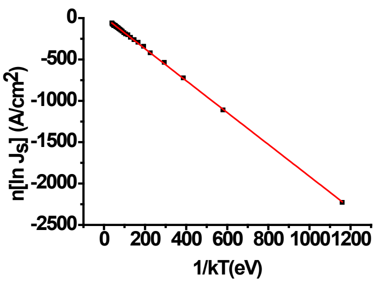


Figure 14 n(lnJ_S)-1/kT plot for n-CdS /p-SnS diode.

Figure 13 the temperature dependence of diode ideality factor and fit very well on the theoretical expression by the tunneling contribution to the recombination process, assumes that the forward current of the heterojunction is also determined by Equation (1). The value of the activation energy E_a can be deduced from experimental data by reorganizing Equation 1 as (Bayhan and Kavasoglu, 2005)

$$n\ln(J_S)=\frac{E_a}{kT}+n\ln(J_{00}) \qquad (10)$$

where E_a represents the interface barrier height for hole in the case of interface recombination. So, the activation energy E_a of the process can be calculated from the slope of a linear plot of $n\ln(J_s)$ versus 1/kT is shown in Figure 14. The value of E_a is 1.610 eV which smaller than energy gap of SnS (E_g = 1.18 eV). This model namely tunneling enhanced recombination in the bulk of the buffer-interface[11] leads the temperature dependence of n as

$$n=(E_{00}/kT)\coth(E_{00}/kT) \qquad (11)$$

where E_{00} is the characteristic tunneling energy measuring the amount of tunneling contribution to the recombination process and the tunneling energy is calculated as about 83.0 meV (as shown in Figure 13). This E_{00} is the large value possibly suggests that deep centers at junction interface involve the current conduction mechanism for the forward bias in our diode.

3. Capacitance-Voltage characteristics

The capacitance-voltage (C-V) relationship for Schottky contact is given by

$$1/C^2=2(V-V_b+(kT/q))/q\varepsilon_0\varepsilon_r N_d A^2 \qquad (12)$$

where ε_S is the permittivity of the semiconductor, *V* is the applied voltage and *A* is the contact area. Theplot of $1/C^2$ versus V at the frequency of 500 kHz for n-CdS /p-SnS heterojunction at room temperature shown in Figure 15. From the x-intercept related to built-in potential V_{ib} is 0.37 eV. Thus, the carrier concentration (N_d) equal to 6.39×10^{14} cm^{-3} was obtained from the slope of $1/C^2$-V curve at room temperature. Based on these data, the energy band diagram for n-CdS/p-SnS heterojunction could be established as shown in Figure 16.

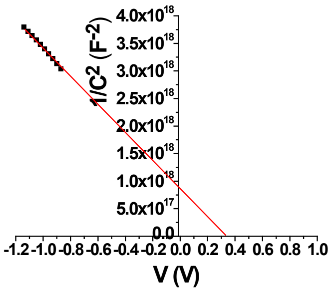


Figure 15 $1/C^2$ vs. V for n-CdS /p-SnS diode at 300 K.

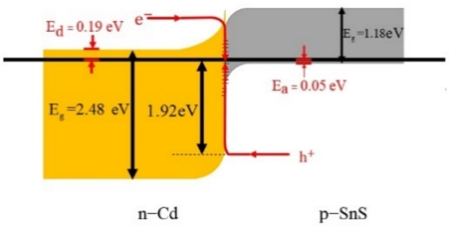


Figure 16 The energy band diagram of n-CdS /p-SnS diode.

CONCLUSION

The n-CdS/p-SnS heterojunction was successfully prepared by thermal evaporating SnS thin films on CBD-CdS layer coated of on FTO substrate. The electrical transport conduction mechanisms were explained on the basis thermionic emission and space charge limited current models. The values of barrier height, ideality factor, and series resistance were calculated from I-V curve at different temperatures by TE, Cheung's method and Norde's methods. The temperature-dependent ideality factor and saturation current were explained by tunneling enhanced recombination model via interface state between p-SnS and n-CdS layers. The built-inpotential at 0.53 eV and the electron concentration of $6.63 \times 10^{14} cm^{-3}$ were determined from C-V measurements at 500kHz. The study of the photovoltaic of our device is in progress.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is financially supported by Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology (KMITL) and it provided the necessary facilities for completes this work.

REFERENCES

Bayhan, H. and A.S. Kavasoglu. 2005. Turneling enhanced recombination in polycrystalline CdS/CdTe and CdS/ Cu (In,Ga)Se_2 heterojunction solar cells. **Solid State Electronics** 49: 991-996

Gullu, H.H., O. Bayrakh, D.E. Yidiz and M. Parlak, 2017. Study on electrical properties of ZnSe/Si heterojunction diode. **J. Mater. Sci: Mater. Electron.** 28: 17806-17815.

Hartman, K, J.L. Johnson, M.I. Bertoni, D. Recht, M.J .Aziz, M.A. Scarpulla and T. Buonassisi. 2011. SnS thin films by RF sputtering at room temperature. **Thin Solid Films** 519: 7421-7424.

Selim, M.S., M.E. Gouda, M.G. El-Shaarawy, A.M. Salem and W.A. Abd El-Ghany. 2013. Effect of thickness on optical properties of themally evaporated SnS films. **Thin Solid Films** 527: 164-169.

Wongcharoen, Ng. and T. Gaewdang. 2017. Influence of annealing temperature on the properties of SnS thin films prepared by vacuum thermal evaporation. **Mater. Sci. Forum.** 890: 295-298.

.

การพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารพิษตกค้างกลุ่ม สารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส และสารกลุ่มออกาโนคลอรีนและไพรีทรอยในพืชน้ำมัน

Method Validation of Organophosphorus, Organochlorine and Pyrethroid in Vegetable Oil

ปิยะศักดิ์ อรรคบุตร[1*] ลมัย ชูเกียรติวัฒนา[1] และชนิตา ทองแซม[1]

Piyasak Akcaboot[1*], Lamai Chukiatwatana[1] and Chanita Tongcham[1]

บทคัดย่อ

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารพิษตกค้าง สารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส, ออกาโนคลอรีนและไพรีทรอยในถั่วเหลือง โดยใช้เทคนิคแก๊สโคมาโตกราฟี ทำการสกัดด้วยวิธี Stienwandter การพิสูจน์ความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์พบว่า Linearity และ Range ของการทดสอบอยู่ช่วง 0.005-2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่า Correlation coefficient > 0.995 การพิสูจน์ accuracy จากการหาค่า % Recovery อยู่ในช่วง 69-105% สำหรับ precision พบว่า % RSD อยู่ในช่วงร้อยละ 0.41-1.87 และค่า HORRAT อยู่ในช่วง 2.59-15.45 การตรวจวิเคราะห์สารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส มีค่า LOD เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ LOQ เท่ากับ 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับสารกลุ่มออกาโนคลอรีนและไพรีทรอย มีค่า LOD เท่ากับ 0.005 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ LOQ เท่ากับ 0.01มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ABSTRACT

The method validation of the organophosphorus, organochlorine and pyrethroid pesticide residue in soybean were developed and validated using gas chromatography. The extraction sample by Stienwandter method. The results of method validation were found the linearity and range within 0.005-2 mg/kg ($R^2 > 0.995$). The accuracy showed the recovery within 69-105%, the precision of the method was considered in RSD range of 2.59-15.45% and HORRAT of 0.41-1.87. The organophosphorus has the limit of detection (LOD) of 0.01 mg/kg and limit of quantitation (LOQ) of 0.02 mg/kg. The organochlorine and pyrethroid were LOD of 0.005 mg/kg and LOQ of 0.01 mg/kg.

Key words: soybean, pesticide residue, gas chromatography

* Corresponding author; e-mail address: piyasak.doa@gmail.com

[1]กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

[1]Agricultural production sciences research and development division, Bangkok 10900

คำนำ

ถั่วเหลืองเป็นพืชผลทางการเกษตรชนิดหนึ่ง ที่มีความต้องการในการบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก เพราะถั่วเหลืองมีคุณค่าทางอาหารที่มีประโยชน์หลายอย่างต่อสุขภาพร่างกาย การปลูกถั่วเหลืองให้ได้ปริมาณของผลผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการจะต้องมีการบำรุงรักษาและกำจัดแมลงศัตรูพืชหรือโรคที่พบในถั่วเหลืองมักเกิดจากเชื้อราแบคทีเรียและไวรัสไส้เดือนฝอยทำให้ผลผลิตเสียหาย ทำให้เกษตรกรมีการใช้สารกำจัดศัตรูพืชในหลายขั้นตอนของกระบวนการเพาะปลูกโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการปฏิบัติทางการเกษตรแบบเดิมที่ใช้สำหรับการปลูกถั่วเหลือง สารกำจัดศัตรูพืชส่วนหนึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความหลากหลายทั้งคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการควบคุมหรือการป้องกันวัชพืชหรือโรคพืชแม้เมื่อนำมาใช้ให้สอดคล้องกับการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (GAP) ควรป้องกันและกำจัดตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร ในปัจจุบันต้องมีการตรวจสุขอนามัยพืชและสารพิษตกค้างในพืชอย่างเข้มงวด ก่อนส่งออกไปขายยังประเทศปลายทาง ดังนั้นหน่วยงานภาครัฐและบริษัทเอกชน จึงต้องปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างในสินค้าเกษตรเพื่อลดปัญหาการกีดกันทางการค้า และเพิ่มความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภคในการเลือกวิธีที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ถั่วเหลืองมีหลากหลายวิธี (วิสุทธิ และคณะ, 2551; Anastassides *et al*., 2003; Keith *et al*., 1983; Steinwandter, 1985) การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีเป็นข้อกำหนดตามมาตรฐานสำหรับห้องปฏิบัติการเพื่อขอรับรองความสามารถของห้องปฏิบัติการ (Laboratory accreditation) ตามมาตรฐานสากล (ISO/IEC17025, 2005) รับรองความสามารถสำหรับวิธีทดสอบ โดยต้องมีการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีตามข้อกำหนดต่างๆ ที่ใช้ในการพิสูจน์ความใช้ได้ของวิธีการ ได้แก่ Linearity/ Range, Accuracy, Precision, LOD และ LOQ (กนกพร และทิพวรรณ, 2547;ทิพวัน นิ่งน้อย, 2549; European Commission (EC), 2000) เพื่อเป็นการยืนยันถึงวิธีการที่นำมาใช้ในการทดสอบว่ามีความถูกต้อง แม่นยำ น่าเชื่อถือ สามารถสอบกลับ ทำให้ผลการวิเคราะห์เป็นที่น่าเชื่อถือและยอมรับได้ตามมาตรฐานสากล และยังเป็นการแก้ไขปัญหาการกีดกันทางการค้าของสินค้าเกษตรที่จะส่งไปขายยังต่างประเทศที่มี โดยมีแก้และปรับปรุงกฏระเบียบร่วมถึงการกำหนดค่ามาตรฐานทางด้านสารพิษตกค้าง (FAO/WHO, 1997; Food and Drug Administration (FDA), 2005) ทำให้ห้องปฏิบัติการต้องมีการวิจัยพัฒนาวิธีวิเคราะห์และตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีก่อนนำมาให้บริการ เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของสถานการณ์ทางด้านความปลอดภัยของผู้บริโภคและเพิ่มความมั่นใจให้แก่ผู้บริโภคสินค้าเกษตรจากประเทศไทย

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมสารมาตรฐาน สารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส, ออกาโนคลอรีนและไพรีทรอย เตรียม Calibration curve ทำการเจือจางจาก mixed standard 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ให้ได้ความเข้มข้นที่ 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 2.0 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

2. วิธีสกัดตัวอย่าง ชั่งตัวอย่าง 5 กรัมใส่ขวดตัวอย่างขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำ 5 มิลลิลิตรทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง จากนั้นเติม 80 มิลลิลิตร Hexane ที่อิ่มตัวด้วย acetonitrile ปั่นด้วย Homogenizer 1 นาที (12000 rpm) เติม NaCl 1 กรัม ปั่นด้วย Homogenizer 1 นาที แช่ตู้เย็น -20 °C ทิ้งค้างคืนเทสารละลายผ่าน Na_2SO_4 ใส่ใน Separation funnel ขนาด 500 มิลลิลิตร ทำการ partition ด้วย acetonitrile ที่อิ่มตัวด้วย Hexane 50 มิลลิลิตร

เก็บชั้นล่าง ส่วนชั้นบนนำไป partition อีกครั้ง เก็บชั้นล่างรวมกันนำไปลดปริมาตรด้วย Rotary evaporator ปรับปริมาตรด้วย Ethyl acetate PR grade 5มิลลิลิตร ดูดมา 1 มิลลิลิตร ไปวิเคราะห์สารกลุ่ม ออร์กาโนฟอสฟอรัส ด้วยเครื่อง GC-FPD แบ่งสารมา 2 มิลลิลิตร ลดปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วย hexane : Dichloromethane (4:1) 2 มิลลิลิตร เทลงในคอลัมน์ที่ Pack ด้วย Silica deactivated water 10% 1 กรัม ที่ชะด้วย ด้วย hexane : Dichloromethane (4:1) 5 มิลลิลิตร เติมตัวชะ ด้วย hexane : Dichloromethane (4:1) 3 มิลลิลิตร และจากนั้น hexane : Dichloromethane (1:1) 10 มิลลิลิตร นำไปลดปริมาตรแล้วปรับปริมาตรด้วย hexane 2 มิลลิลิตร นำไปไปวิเคราะห์สารกลุ่มออกาโนคลอรีนและไพรีทรอยด้วยเครื่อง GC-μECD

3. การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี (validation) มีการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีตามข้อกำหนดต่างๆ ที่ใช้ในการพิสูจน์ความใช้ได้ของวิธี ได้แก่ Linearity/ Range, Accuracy, Precision, LOD และ LOQ

3.1 การหา range ทดสอบ Reagent blank และ Fortified sample 7 ความเข้มข้นๆ ละ 1 ซ้ำ ทำการสกัดในข้อ 5 นำค่าที่ได้ไป plot graph ระหว่าง ความเข้มข้นที่ Fortified sample (แกน X) กับ Response (แกน y) พิจารณาความสัมพันธ์เชิงเส้น

3.2 การหา Linearity ทดสอบ Reagent blank และ Fortified sample ที่ระดับความเข้มข้นใน Range 6 ความเข้มข้นๆ ละ 3 ซ้ำ ทำการสกัดในข้อ 5 นำค่าที่ได้ไป Plot graph ระหว่างความเข้มข้นที่ Fortified sample (แกน x) กับ Response (แกน y) พิจารณาความสัมพันธ์เชิงเส้น จากค่า Correlation coefficient, $R^2 \geq 0.995$

3.3 การหา Accuracy ทดสอบ Reagent blank, sample blank (X_1) และ Fortified sample (X_2) ที่ระดับความข้มข้น (low, medium, high) ความเข้มข้นละ 7 ซ้ำ นำค่าเฉลี่ยที่ได้มาลบกับ Reagent blank และ Sample blank นำไปประเมิน Accuracy โดยการคำนวณ ร้อยละการได้กลับคืน จากสูตร

$$\%recovery = \frac{X_2 - X_1}{C} \times 100$$

3.4 การหา precision โดยการหาค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารในตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ ($\overline{X}$) จากการทดสอบ 7 ซ้ำ และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสารในตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ (SD) นำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ย (%RSD) และ HORRAT (Horwitz, 2000) ได้จาก

$$\%RSD = \frac{SD}{\overline{X}} \times 100$$

$$\text{HORRAT (Horwitz' s Ratio)} = \frac{\%RSD}{\text{Predicted Horwitz RSD}}$$

Predicted Horwitz RSD = $0.66 \times C^{(1-0.5\ \log C)}$

C = อัตราส่วนความเข้มข้นของสารในตัวอย่างที่เติมในการตรวจวิเคราะห์

3.5 การหา LOD (Limit of detection, LOD) ทำการ Fortified sample ที่ความเข้มข้นระดับต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ ทำการทดสอบ 7 ซ้ำ หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) ประเมินค่า LOD โดย LOD เท่ากับ 3 × SD นำค่า LOD จากการคำนวณมา spike ในตัวอย่าง ทำการทดสอบ 10 ซ้ำ

3.6 การหา LOQ ทำการ fortified sample ที่ความเข้มข้นระดับต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ ทำการทดสอบ 7 ซ้ำ หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) ประเมินค่า LOQ โดย LOQ เท่ากับ 10 × SD ซึ่ง LOQ เป็นค่าปริมาณต่ำสุดของวัตถุอันตรายในตัวอย่างที่วิธีทดสอบสามารถตรวจพบ โดยให้ค่า accuracy และ precision ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการทดสอบสารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส และสารกลุ่มออกาโนคลอรีน และไพรีทรอยในถั่วเหลือง (Figura 1) พบว่ามี Linearity และ Range อยู่ในช่วง 0.005 – 1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความสัมพันธ์เชิงเส้นมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.998-0.999 (Table 1) ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนด $R^2 \geq 0.995$ ผลการทดสอบ Accuracy ของวิธีการสารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส, ออกาโนคลอรีนและไพรีทรอย fortified sample ที่ 6 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทดสอบความเข้มข้นละ 7 ซ้ำ พบว่าเปอร์เซ็นต์ของสารที่วิเคราะห์กลับคืนได้ (%recovery) มีค่าระหว่าง 78-98 และผลการทดสอบ Accuracy ของวิธีการสารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส ผลเปอร์เซ็นต์ของสารที่วิเคราะห์กลับคืนได้ มีค่าระหว่าง 69-105 ซึ่งผ่านเกณฑ์ยอมรับของ (AOAC 1993) กำหนดไว้ 60-120 ผลการทดสอบ Precision ได้ค่า %RSD ของสารกลุ่มออกาโนคลอรีนและไพรีทรอย มีค่า %RSD ระหว่าง 7.89-15.45 และมีค่า HORRAT ระหว่าง 0.92-1.64 และผลการทดสอบ Precision ได้ค่า %RSD ของสารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส มีค่า %RSD ระหว่าง 2.59-11.90 และมีค่า HORRAT ระหว่าง 0.41-1.87 (Table 2) ซึ่งผ่านเกณฑ์ยอมรับโดยมีค่า %RSD น้อยกว่า 20 และเกณฑ์ยอมรับ HORRAT มีค่า ไม่เกิน 2 (Horwitz, 2000)

Tabel 1 Determination of linearity for pesticide analytes.

Compounds	Regression equation	Concentrations mg/kg	R^2
dimethoate	y=2621.71874x-3.64032	0.01-1.00	0.99990
diazinon	y=2157.97867x+16.39912	0.01-1.00	0.99960
parathion-methyl	y=2311.96226x+9.48320	0.01-1.00	0.99998
pirimiphos-methyl	y=2011.45241x+13.39587	0.01-1.00	0.99730
chlorpyrifos	y=1572.00050x+27.35939	0.01-1.00	0.99976
parathion-ethyl	y=1960.01656x+8.02502	0.01-1.00	0.99994
pirimiphos-ethyl	y=1937.72582x+10.92178	0.01-1.00	0.99967
profenofos	y=1449.65586x+23.21361	0.01-1.00	0.99994
ethion	y=3118.01467x-1.02641	0.01-1.00	0.99989
triazophos	y=3395.33768x+33.45266	0.01-1.00	0.99882
phosalone	y=1562.10642x+7.90292	0.01-1.00	0.99957
azinphos-ethyl	y=1489.71874x-3.48526	0.01-1.00	0.99875
alpha endosulfan	y=171165.91782x-4588.02866	0.005-1.0	0.99839

Tabel 1 (Continued)

Compounds	Regression equation	Concentrations mg/kg	R2
Beta endosulfan	y=146811.39907x-3638.08464	0.005-1.0	0.99902
Endosulfan sulphate	y=184675.99293x-4338.73068	0.005-1.0	0.99914
Lamda cyhalothrin	y=142373.27482x-5217.54554	0.005-1.0	0.99836
Lamda cyhalothrin	y=142373.27482x-5217.54554	0.005-1.0	0.99836
Permethrin	y=105886.90765x-3475.34526	0.005-1.0	0.99766
Cypermerthrin	y=7906.89633x-10206.36216	0.005-1.0	0.99871

ผลการทดสอบค่า LOD ทำการ Fortified ตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ คือที่ระดับ 0.005 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำการทดสอบ 10 ซ้ำ หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) LOD เท่ากับ 3 × SD ได้ค่า LOD จากการคำนวณสารกลุ่มออกาโนคลอรีนไพรีทรอยในถั่วเหลือง มีค่าเท่ากับ 0.005 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนสารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัสในถั่วเหลืองปรับค่าเป็น 0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมทำการทดสอบ 10 ซ้ำ หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) LOD เท่ากับ 3 × SD ได้ค่า LOD มีค่าเท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ผลการทดสอบ LOQ โดยการ fortified ตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ คือที่ระดับ 0.005 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สารกลุ่มออกาโนคลอรีนและไพรีทรอยในถั่วเหลือง ทำการทดสอบความเข้มข้นที่ระดับ 0.005 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมละ 10 ซ้ำหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) LOQ เท่ากับ 10 × SD ได้ค่า LOQ จากการคำนวณที่ระดับ 0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของ ส่วนสารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัสในถั่วเหลือง ทำการทดสอบความเข้มข้นที่ระดับ 0.01มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมละ 10 ซ้ำหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) LOQ เท่ากับ 10 × SD ได้ค่า LOQ จากการคำนวณที่ระดับ 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

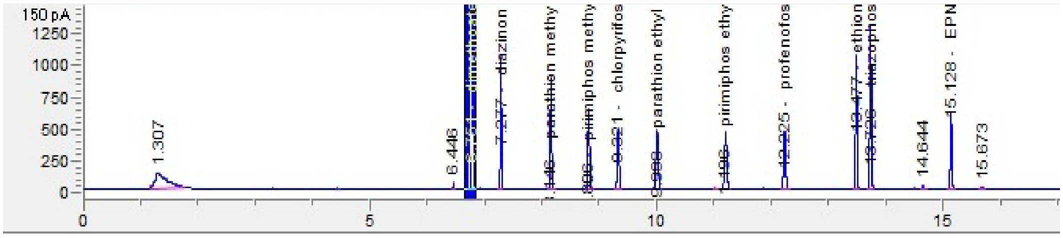
Table 2 Concentration level intervals of the spiked samples, recoveries and results of precision in terms of %RSD and HORRAT for pesticide analytes.

Compounds	Concentrations (mg/kg) n=7					
	0.01*, 0.02			0.5		
	%Rec	%RSD	HORRAT	%Rec	%RSD	HORRAT
Dimethoate	81	9.78	1.56	98	4.25	0.74
Diazinon	78	7.88	1.28	89	5.05	0.68
Parathion-methyl	83	11.9	1.43	85	6.01	0.66
Pirimiphos-methyl	73	8.99	1.44	82	4.36	0.69
Chlorpyrifos	85	9.17	1.23	96	3.27	0.72
Parathion-ethyl	79	7.34	1.41	84	4.68	0.81

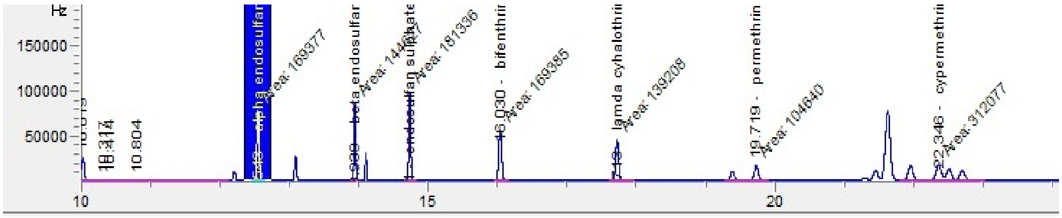
Table 2 (Continued)

Compounds	Concentrations (mg/kg) n=7					
	0.01*, 0.02			0.5		
	%Rec	%RSD	HORRAT	%Rec	%RSD	HORRAT
Pirimiphos-ethyl	69	10.03	1.87	80	4.68	0.79
Profenofos	77	6.89	1.56	86	3.89	0.68
Ethion	71	8.42	1.54	94	4.57	0.65
Triazophos	74	9.14	1.51	87	3.28	0.69
Phosalone	75	9.88	1.56	85	4.17	0.74
Azinphos-ethyl	74	7.89	1.53	84	4.05	0.84
Alpha endosulfan*	79	12.65	1.45	87	9.91	1.08
Beta endosulfan*	72	14.27	1.52	84	9.54	0.97
Endosulfan sulphate*	75	11.69	1.62	89	9.34	0.94
Lamda cyhalothrin*	80	15.45	1.51	84	8.17	0.92
Permethrin*	85	13.9	1.59	83	10.25	0.96
Cypermerthrin*	80	14.81	1.48	81	7.89	1.07

* organochlorine and pyrethroid fortified 0.01 mg/kg



(1)



(2)

Figure 1 Representative (1) GC-FPD and (2) μECD chromatogram of pesticides analytes.

สรุป

ผลการทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารพิษตกค้างวิธีทดสอบสารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส, ออกาโนคลอรีนและ ไพรีทรอยในถั่วเหลือง ให้ผลการทดลองดังนี้ Range และ Linearity ของวิธีวิเคราะห์ มีค่า Correlation coefficient (R^2) ≥ 0.995 และมีค่า range อยู่ในช่วง 0.005-1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม Accuracy และ precision สารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัส และสารกลุ่มออกาโนคลอรีน ไพรีทรอย ในถั่วเหลืองที่ 6 ระดับความเข้มข้นผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด คือมีค่า %Recovery อยู่ในช่วง, 69-105 และ 78-98 ตามลำดับ %RSD น้อยกว่า 20 และมีค่า HORRAT ไม่เกิน 2 สำหรับค่า LOD ผลการทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารตกค้างวิธีทดสอบสารกลุ่มออกาโนฟอสฟอรัสและสารกลุ่มออกาโนคลอรีน และไพรีทรอย ในถั่วเหลือง มีค่า LOD เท่ากับ 0.01 และ 0.005 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนค่า LOQเท่ากับ 0.02 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ

กติตกิรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มงานวิจัยสารพิษตกค้าง กลุ่มวิจัยวัตถุมีพิษการเกษตร กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยและสถานที่ห้องปฏิบัติการตรวจสอบสารพิษตกค้างที่ได้รับรองมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2005

เอกสารอ้างอิง

กนกพร อธิสุข และทิพวรรณ นิ่งน้อย. 2547. Method Validation **เอกสารประกอบการฝึกอบรม**. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ทางเคมีโดยห้องปฏิบัติการเดียวสถาบันอาหาร.

ทิพวัน นิ่งน้อย. 2549. **แนวปฏิบัติการทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์เคมี**. เอกสารประกอบการอบรม. ณ โรงแรมมิราเคิล กรุงเทพฯ.

วิสุทธิ เชวงศรี รัชนี สุวภาพ และปิยะศักดิ์ อรรคบุตร. 2551. **การพัฒนาวิธีวิเคราะห์สารพิษตกค้างกลุ่ม Triazole ในมะม่วง.** ผลการปฏิบัติงานประจำปีงบประมาณ 2551. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร.

Anastassides, M., Lehotay, S.J., D. Stajnbaher and F.J. Schenck. 2003. Fast and Easy Mulitiresidue Method Employing Acetonitrile Extraction/partitioning “Dispersive Solid-phase Extraction” for the Determination of Pesticide Residues in Produce. **J. AOAC Int.** 86, 412-131.

European Commission (EC). 2000. Guidance Document on Residue Analytical Methods. **SANCO/825/00 rev6 20/06/00**. 16p.

FAO/WHO. 1997. **FAO manual on the submission and evaluation of pesticide residues data for the estimation of maximum residue level in food and feed.** Food and Agricultural Organization of the United Nation. Rome.

Food and Drug Administration (FDA). 2005. **Validation and Verification Guidance for Human Drug Analytical Method.** USA: ORA Laboratory Procedure.

Horwitz, W. 2000. The Potential Use of Quality Control Data to Validate Pesticide Residue Method Performance. In Principle and Practice of Method Validation. A. Fajgeij and A. Ambrus (eds), **the Royal Society of Chemistry 2000**, U.K.

ISO/IEC 17025. 2005. General Requirement for the Competener of Testing and Calibration Laboratories. 280.Kuet A.C.L. and L. Seng. 2004. Solid phase Extraction Clean up Method for the Determination of Organophosphorus Pesticides in vegetables. **Malaysian Journal of chemistry.** 6: 29-38.

Keith,L., H.W. Crummett, J. Deegan, R.A. Libby, J.K. Taylor and G Wentler.1983. Principle of Environmental Analysis. **J Anal. Chem**. 55: 2210-2218.

Steinwandter, H. 1985. Universal 5 min. On-line Method for Extracting and solating Pesticide Residue and Industrial Chemicals. **Fresenius Z. Anal Chem**. 314: 129-130.

An Approach for Using Electrochemical Impedance Spectroscopy for Testing the Coating Ability of Non-intended BPA Lacquer on Can Surface

Natapol Suetrong[1] and Chaiya Prasittichai[1*]

ABSTRACT

Newly developed organic coatings have been recently introduced to the packaged food industries. This implementation requires rapid and reliable measurement to probe the performance of these organic coatings in actual storage environment. Here, we report the use of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) for determining the storage lifetime of several organic coatings used in the packaged food industries. We found that EIS could offer a quicker and comparatively more reliable than traditional measurement. We also describe the effects of glass transition temperature, curing time and curing temperatures on the storage lifetime. In addition, the effects of certain chemicals in food on organic coatings performances are described. We believe that the results we presented here could be tremendously beneficial for packaged food industries for designing types of appropriate organic coatings.

Key words: BPA-NI organic coatings, electrochemical impedance spectroscopy, shelf-life

* Corresponding author; e-mail address: fscicyp@ku.ac.th, chaiya.pr@ku.th

[1]Department of Chemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Thailand has been ranked as one of top exporter food industry in the world. As a result, the canned food industry is pivotal for Thailand's economy. Most of the canned food products are exported to the countries in European Union (EU) under several trade agreements. Recently, EU has implemented a food safety regulation that limit the amount of Bisphenol A (BPA) in food and also demand the food exporter to use different types of lacquer that don't contain BPA. As a result, numerous new types of no BPA organic coatings (denoted here BPA-NI) have been steadily developed in packaged food industry. The discovery of newly developed BPA-NI organic coatings also require a rapid yet reliable method to facilitate various film development.

The can surface can be normally categorized into two types, namely tinplate (TP) and tin-free steel (TFS). When use in food storage, these two types of can surface must be sealed with organic coatings on both sides to prevent a contact and reduce the reactions between food and can surface. If we view organic coatings film as a series of resistance that prevent the interaction between chemicals in food and can metal surface, a good film must possess a high resistance. In general, one can relate the coating ability of organic coatings with this series of resistance. Typically, good organic coatings possess resistance more than 10^9 ohm. Once film is in contact with certain chemicals (mostly oxidizing agents) in food, the film resistance value start to drop. The reduction of the value of series of resistance correlate with the deterioration rate of the film. As a result, one could use this method to predict the shelf-life of organic coatings in interested environment.

This report describes the factors in the packaged food production processes that could affect the storage lifetime of BPA-NI organic coating. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) will be employed for measuring the reduction of film resistance and make a correlation with the storage lifetime. In addition, we would like to emphasize on our claim that EIS offer a faster and more reliable measurement than conventional visual method. We believe that our findings could be beneficial for packaged food industry and researcher whose research involve around the use of organic coatings for corrosion prevention.

MATERIALS AND METHODS

1. Materials and chemicals

Potassium chloride (KCl) was purchased from Sigma-Aldrich. Hydrochloric acid was obtained from Carlo Erba. The copper tape was generously provided by SEM laboratory in Chemistry department. All chemicals were A.R. grade and were used without further purification. Thermogravimetric analyzer, TGA 8000, Perkin Elmer, United states. Scanning electron microscope (SEM), Quanta 450, FEI, Netherland. Potentiostat, PalmSens4, PalmSens, Netherlands

2. Preparation of lacquer coated can samples

The samples used in this report are courtesy of AkzoNobel (Thailand) Co, LTD. Industrial grade of organosol and polyester are coated on the can surface. Four types of film, namely Organosol/polyester (L1), Polyester/organosol (L2), Polyester/polyester (L3) and Organosol (L4), are preliminarily studied. Generally, heat treatment after casting the polymer on the surface is performed (125 °C for 90 mins) to strengthen the adhesion between film and metal surface. The thickness of each film in our experiment, as measured by profilometry, is around 13 μm. Prior to electrochemistry measurement, the morphology of lacquer was examined by microscope. Differential Scanning Calorimetry was used to determine the glass transition temperature of each film.

3. Electrochemical determination of canned

Electrochemistry was done in a conventional 3-electrode setup. Coated can sample was used as the working electrode; Pt mesh was used as the counter electrode and Ag/AgCl was employed as the reference electrode. Before electrochemistry measurement, coated can samples were cut into individual electrodes (7x2 mm.). Each piece of electrode was immersed into a food simulant solution. Five percent by weight of citric acid solution and 3.5% w/w of NaCl solution were chosen as a representative of the food stimulant. Each piece of sample was then measured the film resistance over storage time. This information was then used to approximate the shelf life of the coatings. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) was used to measure the change in impedance of coated films. The measuring frequency range was 1-10^5 Hz with 2 mV perturbation. Samples were immersed in 0.1M KCl solution at room temperature during the EIS test.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Morphology of lacquer on the can surface

SEM in Fig. 1 reveal the morphology of bare can and BPA-NI coated can samples. Apparent rough surface is seen on the bare can surface, as evident in Fig1a. Energy-Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) also reveal that the can surface used in this study is covered with thin layer of Sn (or SnO_2 once it is exposed to ambient air). A strong signal of Fe, from EDS, suggests that the thickness of this Sn layer maybe only a couple of microns. Typically coating thin layer of Sn will serve two purposes; to prevent Fe oxidation and increase the coating adhesion. Fig. 1b shows the lacquer covered can surface. Despite the noticeable scattered particles (most likely from the contamination from *ex situ* analysis), a much smother surface is seen. Only EDS signals of C and O, which are the main components in BPA-NI films, are observed in the BPA-NI coated sample. This implies that during the lacquer coating process, there is no Fe^{2+} or Sn^{2+} migration into organic film. Such evidence will be later used to probe the protecting ability of each type of BPA-NI lacquer.

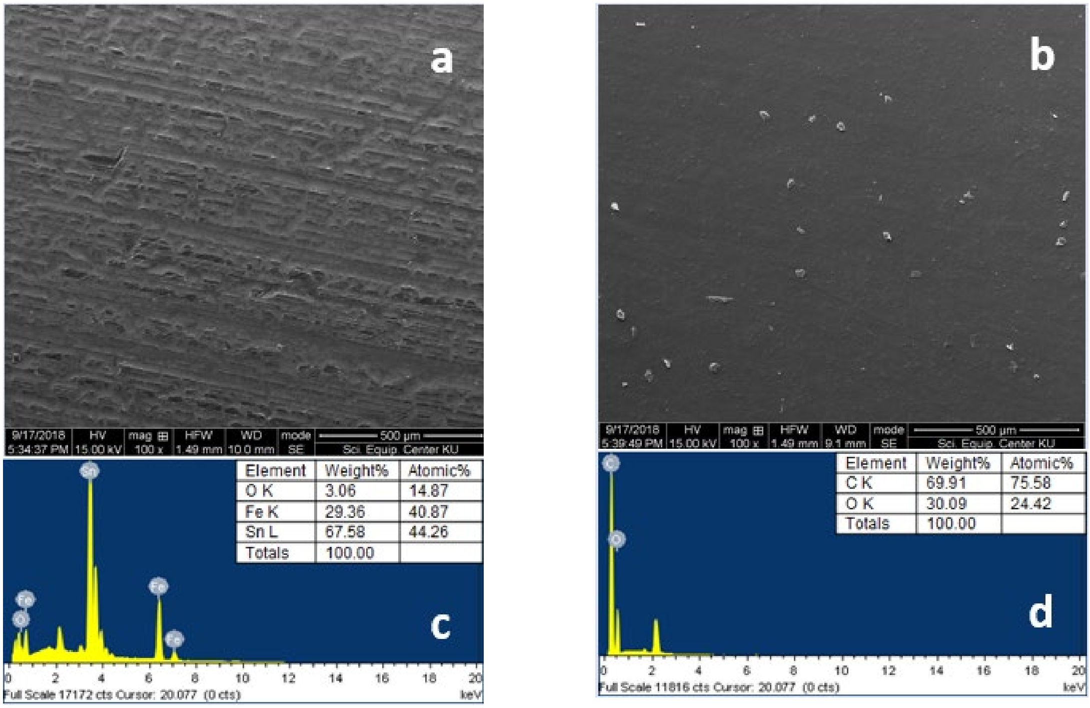


Figure 1 SEM images of (a) bare can surface and (b) BPA-NI coated can surface. EDS spectra of (c) bare can surface and (d) BPA-NI coated can surface.

2. Effects of heat treatment on the glass transition of BPA-NI lacquer

In general, lacquer film is subjected to heat treatment prior to actual usage. This process typically enhances the coating ability of lacquer significantly but there is still little to no explanation to explain the boosting performance. Some research in BPA containing lacquer has claimed that performing heat treatment will likely generate more cross-linking polymer in lacquer, leading to a higher glass transition temperature (Tg). This, in turns, will generate a film that is able to resist oxidation process while use in the actual food. However, there is no evidence on BPA-NI lacquer. This leads us to investigate the effect of heat treatment and subsequent change in Tg. We chose one of BPA-NI lacquer for DSC analysis. DSC curves of unheated and heat-treated lacquer films, displayed in Figure 2, reveal slight different in Tg. The Tg values of untreated and heat-treated samples are 37.06°C and 38.62°C, respectively. The small discrepancy of these two samples differ from sample to sample and was found to be statistically indifferent. As a result, we believe that heat treatment on BPA-NI lacquer may not lead to a significant Tg increase.

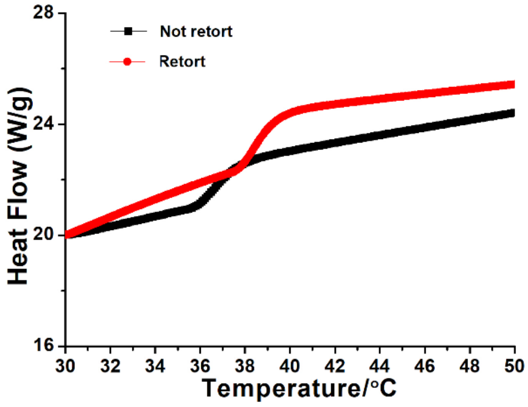
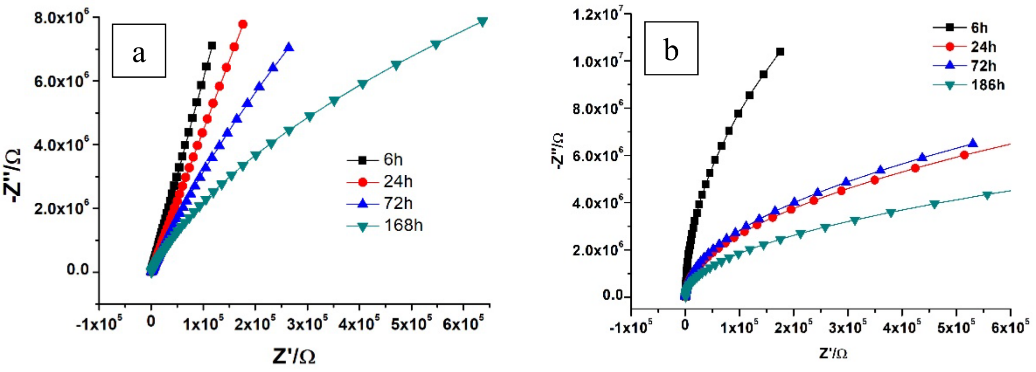


Figure 2 DSC curves of not retort and retort.

3. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurement

Figure 3. depicts general Nyquist plots of BPA-NI lacquer L1 immerse in a solution of citric acid at pH 2.0 (Fig.3a) and 5%w/w NaCl solution (Fig. 3b) at the different immerse time. Evidently, as the immerse time increase, the surface resistance associated with the lacquer and the active ions start to reduce. This reduction is likely from the mild chemical reaction between active species in the food stimulant with lacquer. The stronger of the chemical reaction, the greater reduction in surface resistance. From the data in Fig.3, we employ a simple Randle equivalent circuit to extract this resistance. We found that a typical BPA-NI film before immerse in the food stimulant, the value of surface resistance is around 10^9 ohm at low frequency (0.1 Hz). This value drops over the immerse time and start to plateau at around 10^4 ohm. We also observe that at that point, a small pocket of air is formed in the lacquer film. This pocket of air is the by-product of the Fe oxidation on the can surface. Thus, we conclude that lacquer film is no longer capable of preventing Fe oxidation when the surface resistance of lacquer reach ~10^4 ohm. This information is then used to predict the shelf-life of each BPA-NI lacquer on different food simulant. Table 1 summarizes the expected shelf-life of each BPA-NI lacquer by the method described above.



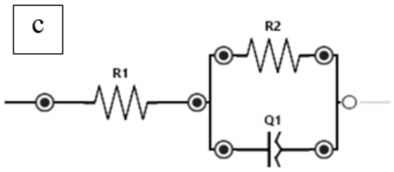


Figure 3 Nyquist plots of L1 (a) immerse in citric acid, (b) immerse in NaCl versus times and (c) a scheme of simple Randle equivalent circuit.

Table 1 Shelf life of lacquer (L1, L2, L3 and L4).

Lacquer type	Citric acid Expected shelf-life (day)	NaCl Expected shelf-life (day)
Organosol/polyester, L1	170	190
Polyester/ organosol, L2	> 500	310
Polyester/polyester, L3	1863	930
Organosol, L4	352	285

From the information in Table 1, we clearly observe that BPA-NI lacquer Polyester is capable to resist both chemicals exceptionally more than other types of lacquer. Current effort is being made to understand why this film has the ability to resist the change (electrochemically) better than other types of BPA-NI lacquer. Such study will be subsequently presented elsewhere.

CONCLUSION

We demonstrated the use of electrochemical impedance spectroscopy to predict the shelf-life of BPA-NI lacquer in can container. We use the rate of the drop in the surface resistance as the way to predict the shelf-life of lacquer. Preliminary result suggests that a lacquer containing polyester as the main component has the longest shelf-life. We believe that our findings could be a valuable method for determination of appropriate lacquer and could offer greatly benefit to food industry in the foreseeable future.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work receives partial financial support from Kasetsart University Research and development institute (KURDI) and full funding support from Agricultural Research Development Agency (ARDA) under contract No. POP6105021820. The facilities support from the Department of Chemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok.

REFERENCES

Duarte, R.G., A.S. Castela and M.G.S. Ferreira. 2006. Influence of the solution cation mobility on the water uptake estimation of PVC Plastisol freestanding films by EIS. **Progress in Organic Coatings**, 57: 408-415.

Reuvers, N.J.W., H.P. Huinink, O.C.G. Adan, S.J. Garcia and J.M.C. Mol. 2013. Water uptake in thin nylon 6 films as measured by electrochemical impedance spectroscopy and magnetic resonance imaging. **Electrochimica Acta**, 94: 219-228.

Xia, D., S. Song, W. Gong, Y. Jiang, Z. Gao, and J. Wang. 2012. Detection of corrosion-induced metal release from tinplate cans using a novel electrochemical sensor and inductively coupled plasma mass spectrometer. **Journal of Food Engineering**, 113: 11-18.

Álvarez, D., A. Collazo, and C. Pérez. 2013. The use of sol–gel film as pre-treatment for tinplate used in the canning industry. **Progress in Organic Coatings**, 76: 1819-1826.

Jafari, S.M., M. Amanjani, M. Ganjeh, I. Katouzian and N. Sharifi. 2018. The influence of storage time and temperature on the corrosion and pressure changes within tomato paste cans with different filling rates. **Journal of Food Engineering**, 228: 32-37.

Kontominas, M.G., M.I. Prodromidis, E.K. Paleologos, A.V. Badeka and D. Georgantelis. 2006. Investigation of fish product–metal container interaction using scanning electron microscopy–X-ray microanalysis. **Food Chemistry**, 98: 225-230.

Yu, Z., Y. Luan, H. Li, W. Wang, X. Wang and Q. Zhang. 2019. A disposable electrochemical aptasensor using single-stranded DNA–methylene blue complex as signal-amplification platform for sensitive sensing of bisphenol A. **Sensors and Actuators B: Chemical**, 284: 73-80.

Silica Based Monolithic Material as Adsorbent for Heavy Metal Ions

Wimonrut Insuan[1*], Bundit thakummee[2], Kantapong Siriphongsittha[2], Kritsanachart Sangjhan[2] and Pakphum Simachaya[2]

ABSTRACT

In this study, silica based monolithic material was synthesised, characterised and used as adsorbent. Silica based monolith was prepared by a sol-gel method without functionalised surface. The application of silica based monolith was the use as adsorbent for a feasibility studies of removal adsorbent of cadmium as model analyte. The monolith material was fabricated by an in-situ sol gel reaction in a plastic molds. Those with different shapes including cylindrically and platelet shape was studied. The synthesised materials were characterised by scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Cylindrically shaped of the material had uniformly skeleton of a few micrometers, high through pore and stronger than platelet shape. The optimal condition for the monolithic sorbents were tested with fortified water containing metal ions and the cadmium adsorption results showed that the adsorption capacities are strongly influenced by the pH, contact time, initial ion concentration and ion interferences. The preliminary water testing indicates that no content of cadmium in the water samples.

Key words: silica based monolith, adsorbent, heavy metals, morphology

* Corresponding author; e-mail address: cvtwri@ku.ac.th

[1]Department of Veterinary Technology, Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Undergraduate student of bachelor degree of science (Veterinary Technology),Department of Veterinary Technology, Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Monolithic material is made of a single piece of porous material with bimodal pore size distribution, namely macropores and mesopores. The macropores or through-pores have diameters of micro- to nanometer. The mesopores have smaller diameters of nano-scale that provide a large surface area where interaction with analytes occurs. These materials have been employed in a wide range area of extensive researches. Many applications of the materials have been reported including solid-phase extraction, sample pre-concentration and chromatographic separation in many fields, such as environment, pharmaceutical, and food science. The monolith is then successfully used in the sample preparation step for cleaning up and/or preconcentration of analytes by removing the matrix before instrumental analysis. (Namera *et al.*, 2011; Namera and Saito, 2013; Nema *et al.*, 2014)

The silica based monoltih is prepared by a sol-gel process or polymerisation process either *in situ* in a tube, such as in a glass tube or in a mold. (Hara *et al.*, 2010; Kobayashi *et al.*, 2006) The reaction is occurred from hydrolysis of alkoxy groups of tetra-alkoxysilane, namely tetra-methoxysilane (TMOS) or tetra-ethoxysilane (TEOS) and followed by a catalytic polycondensation to produce a macromolecular network of siloxane bonds. During mixing, the sol-gel reaction initiates at numerous sites within the alkoxide-water solution. Chemical reagents for the preparation of sol-gel materials normally include at least one precursor, a solvent to dissolve the precursor, an acid or basic catalyst, and water. (Walcarius and Collinson, 2009) The synthesised structure of monolithic media is therefore a continuous network with high through pore and very small mesopores, providing a large surface area that is attractive for being employed as an adsorbent.(Namera *et al.*, 2011; Namera and Saito, 2013; Nema *et al.*, 2014)

Rapid industrialisation and modernisation have introduced substantial amounts of toxic heavy metals into the aquatic and terrestrial environment which possess a serious threat to the flora and fauna.(Ahmad *et al.*, 2015) In recent years, considerable research work has been done and is currently underway on a number of mesoporous silicas and their modifications to remove different kinds of heavy metals for environmental cleanup is the essential one.(Lee *et al.*, 2016; Tu *et al.*, 2015) Out of all these methods, adsorption is particularly attracting scientific focus mainly because of its high efficiency, low cost, easy handling and high availability of different adsorbents. (Ahmad *et al.*, 2015; Tu *et al.*, 2015)

In this study, silica monolith material with platelet and rod-like shapes were prepared via sol-gel method. The surface properties of the synthesised materials were characterised by SEM. These materials were used as adsorbents to investigate their behaviors in removing cadmium from aqueous solutions. The factors affecting adsorption including pH of solution, contact time, and initial ion concentration and ion interference were discussed.

MATERIALS AND METHODS

1. Materials

For synthesis of silica monolith in a plastic molds, tetramethylorthosilicate (TMOS, > 98%) bought from Merck (Darmstadt, Germany) was used as a precursor. Polyethylene glycol (PEG) with an average molecular weight of 10,000 g/mol bought from Fluka (Germany) was used as a porogenic reagent, and emulsifier for silane and macropore template. Urea (> 99%) was purchased from SCR (China) and employed to prepare mesopore. The standard solution of cadmium for AAS determination was purchased from PanReac AppliChem (Spain).

2. Preparation of silica monolithic adsorbent

The synthesis of silica monolith was adapted from the method of Kobayashi *et al*. (Kobayashi *et al*., 2002) The solution for silica monolith synthesis was prepared from 400 μL of tetramethylorthosilicate (TMOS), 0.088 g of polyethylene glycol (PEG), 0.09 g of urea, and 1.0 mL of 0.01 M acetic acid. The solution was homogenised by using a magnetic stirrer with a rate of 750 rpm. The resulting homogenous solution (500 μL) was then poured onto a plastic molds to make a cylindrical and platelet form. The gel was subsequently aged overnight at 40 °C and further raising temperature to 120°C and kept constant for 6 hours, giving a formation of the monolithic structure. (Insuan *et al*., 2016)

3. Characterisation of the surface

The surface and metal analysis of the synthesised monolith was characterised by using a scanning electron microscope (Quanta 450, FEI, Hillsboro, Oregon, USA) and EDS analyses were employed respectively.

4. Metal adsorption test

The monolith adsorbent (0.1408 ± 0.0123 g) of the cylindrical shape was allowed to equilibrate with 50 mL of fortified water that was prepared by spiked the concentration of metal ions into the ultra-pure water. The experiments were carried out in a glass vials by adding a piece of monolithic material to fortified water solution at 10 ppm of cadmium. The contact time and temperature were fixed at 60 min and 25±2°C, respectively. The pH of the solution varies from 2 to 6. The adsorbent and fortified water sample were then filtrated before measuring the cadmium concentration by Atomic absorption spectroscopy (AAnalyst 200, PerkinElmer, USA). The optimum contact time and initial of metal concentration were measured. The contact time was studied between 0-120 min and the initial ion concentration was between 0.1-20 ppm. Each analysis was done in triplicate in order to get accurate results.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Characterisation of the surface

The morphology of fabricated silica monolith formed in the 24 well-plate and 3 mL-syringe tube was characterised by using a scanning electron microscope (SEM), giving the SEM images presented in Figure 1(A) and 1(B), respectively. The photograph of the platelet form and cylindrical form of the monolithic material was inserted. Figure 1(A) and 1(B), both platelet and cylindrical form of the monolithic material showed the silica network and continuous structure. The interconnected particle size of platelet and cylindrical form is averagely 2.04$\pm$0.37 and 0.95$\pm$0.08 micrometer, respectively. The through pore size of platelet and cylindrical form was approximately 2.85$\pm$0.33 and 1.65$\pm$0.29 micrometer, respectively. From these results, cylindrical form exhibits the smaller particle size that should be highest surface area, pore size and pore volume than platelet form. Especially, we found the monolith in the platelet form is more fragile, easy broken and more losing in the synthesis step than cylindrical shape. Therefore, a feasibility of the monoliths in cylindrical shape for adsorption of heavy metal ions will be studied in the following experiments.

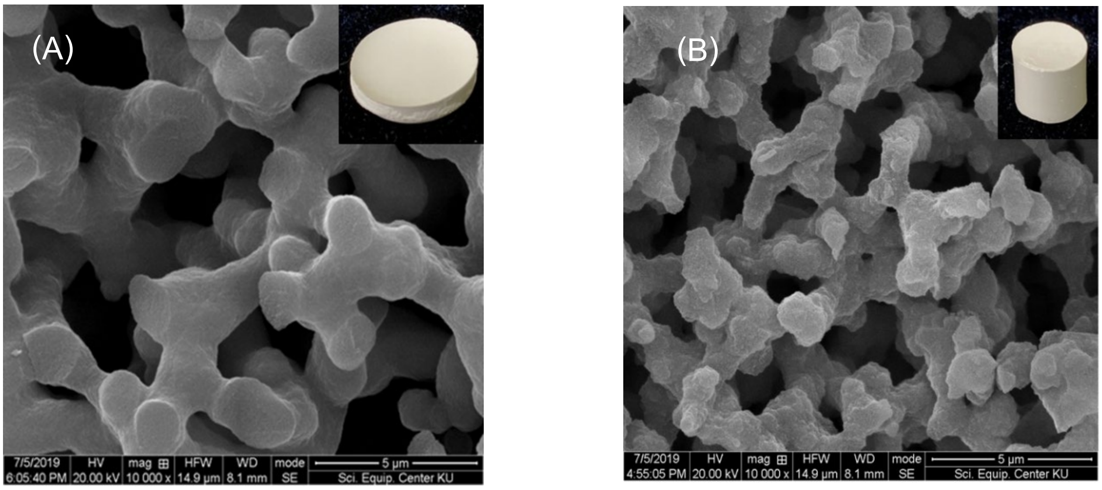
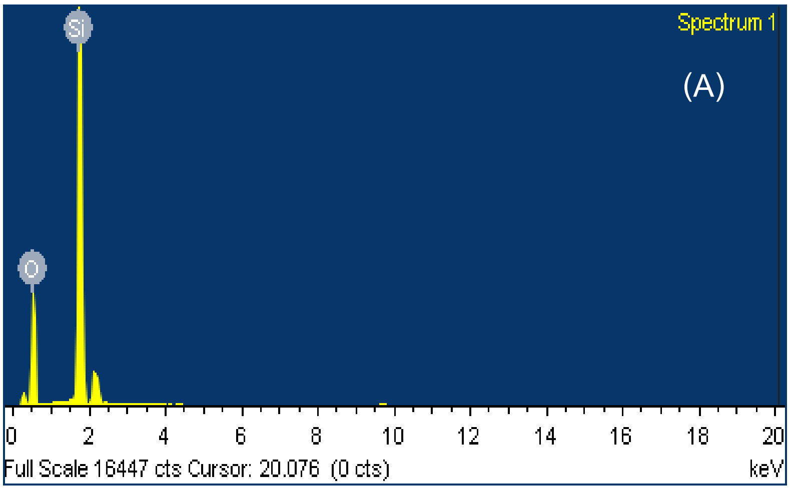


Figure 1 SEM image of the monolithic silica of platelet shape (A) and cylindrically shape (B) with the magnification of 10000X, and the photograph of the synthesised monolith in the platelet and cylindrical shape (insert).

2. Heavy metal adsorption studies

The adsorption capacities of silica-based monolith of the rod-like shape was characterised by the SEM–EDS analysis and AAS determination. The results of EDS analysis showed before and after adsorption of cadmium and copper are presented in Figure 2(A) and 2(B), respectively. After adsorption of cadmium and copper ions are present in the tested solution, the surface morphology of the adsorbent changed to rough and more uneven which could probably be due to the reorganisation of surface binding the metal ions. From the EDS analysis before adsorption, the major constituent of silica synthesized material (SiO_2), along with only the elements Si (58.41%) and O (41.59%) is evident

to be present in the material (Figure 2A). After adsorption of cadmium and copper (Figure 2B), the EDS analysis showed the presence of cadmium and copper ions 0.09% and 0.33%,respectively with an increase in the percentages of O (47.15%), suggesting that the adsorption of metal ions by the silica based material may also use as adsorbents for their removal from aqueous solutions. For more detailed, we studied for the effect of the adsorption properties of this material towards cadmium ions.



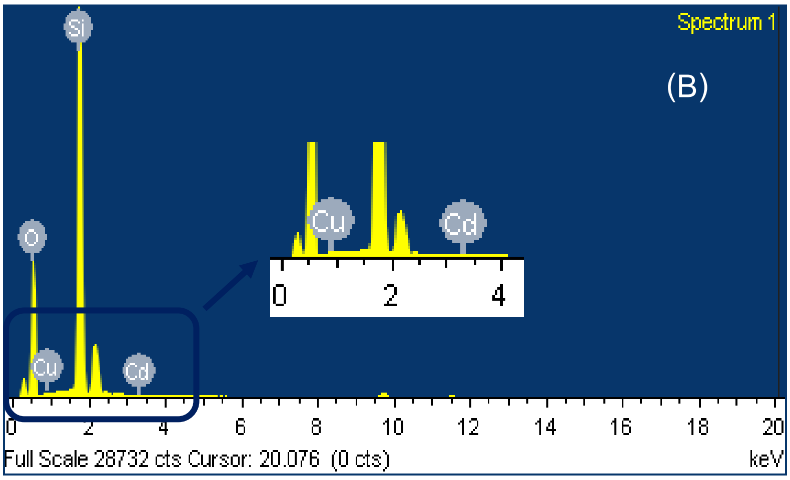


Figure 2 EDX spectrum of the monolith material showed before (A) and after adsorption (B) of metal ion. The insert image showed the EDS spectrum of copper and cadmium onto the silica monolith surface.

The effect of pH on the cadmium adsorption on silica based material is presented on Figure 3(A). The percentage of cadmium adsorption is strongly dependent on the pH of the solution. The adsorption was found to increase with the increase in pH from 2 to 6, and reached a maximum value (10.3%) in pH6. The pH of the aqueous metal solution affects sorption through the adsorbent surface charge, the degree of ionisation and speciation of the metals ion as well. (Abdel and Al-Asheh, 2009; Lei *et al.*, 2015)

The effect of the contact time on the cadmium adsorption on silica based material is presented on Figure 3(B). The percentage of cadmium adsorption was found to increase with the increase in contact time and reached a maximum value (18.4%) within 120 min. The longer the interaction time then more adsorbent that will be adsorbed.(Rita *et al*., 2018) Therefore, in the present study the contact time is 120 min. This is shorter than the reported contact time of 150 min for removal of copper by chick egg shells sorption (Abdel and Al-Asheh, 2009) and longer than the reported time of 60 min for removal of both chromium and cadmium by maize tassel adsorbent. (Zvinowanda *et al*., 2009)

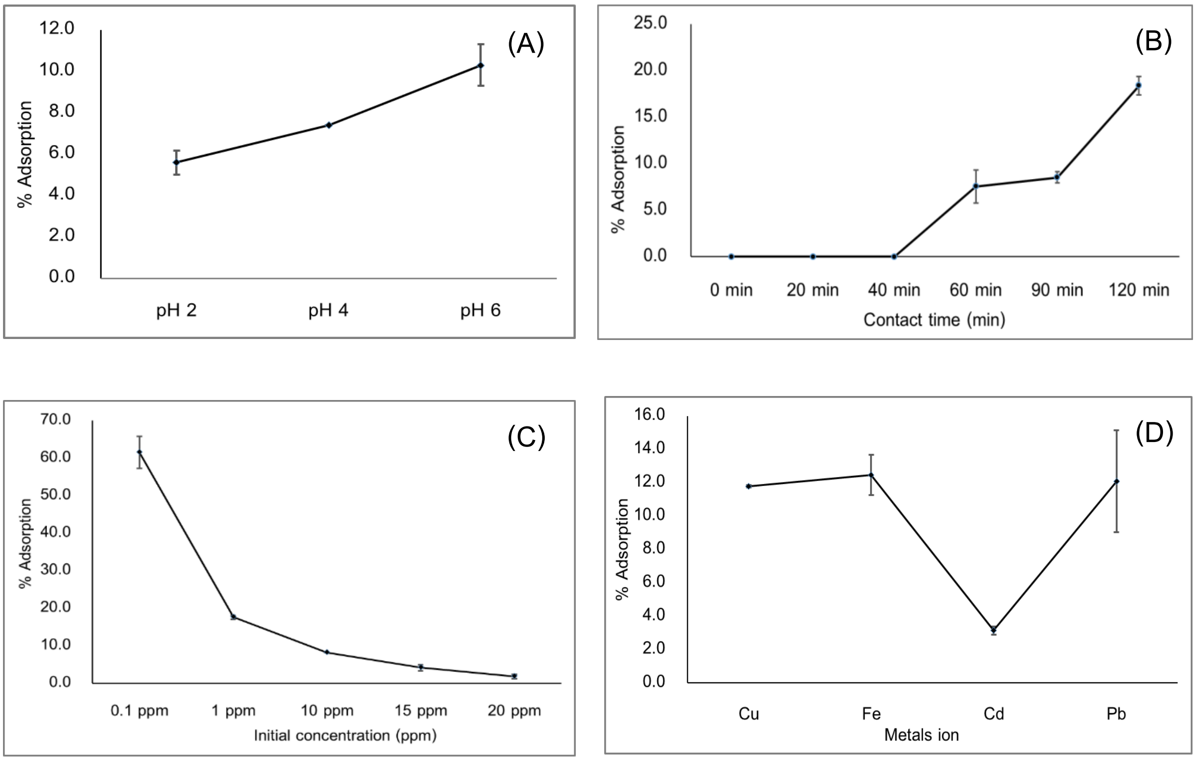


Figure 3 The effect of pH (A), the effect of contact time (B), the effect of initial concentration (C) and the effect of the ion interferences (D) on the adsorption of cadmium ion on silica monolith.

An increase of adsorption with increasing of the initial cadmium concentration was observed for synthesised material. The maximum percentage removal of cadmium observed was 61.6% when the initial copper concentration was 0.1 mg/L [Figure 3(C)]. The graph suggests that the cadmium ions adsorption increased in the low initial concentration and then decreased slowly with further increase in the initial concentration. This can be described by the increase in metal ions concentration to a fixed number of available active sites on the adsorbent. (Malkoc, and Nuhoglu, 2006)

Metals ion interference (Fe, Pb, and Cu) were added into the fortified water sample that contained the concentration of cadmium. The plot showed the metals ion can be interference the adsorption of cadmium onto the monolith adsorbent (Figure 3(D)). In the mixed metal ion solutions, silica monolith shows lower adsorption selectivity for cadmium significantly difference ($p<0.01$)

compared to other interference cations (Fe>Pb>Cu>Cd). The repeatability of the silica monolith was studied by comparison of concentration between day 1, 2, 3 and 4. The results showed that the percentage of cadmium adsorption between day was not significantly different ($p<0.05$).

CONCLUSION

The aim of this work was to study the possibility of the synthesised silica monolith as adsorbent for removal the cadmium. The results demonstrated that the removal of cadmium from aqueous solutions strongly depended on pH, initial cadmium concentration, contact time and metals ion interference. However, the cadmium exhibited poor extraction percentage compared to lead, iron, and copper. From this study, it was observed that silica monolith can be used as an alternative adsorbent for metals ion removal for polluted water and wastewater. If silica monolith is to be used as a adsorbent for cadmium, there is a need to adjust the pH of the solution to optimal values and removed the ion interferences obtained in this study. Chemical modification of the adsorbent and some effective parameter such as reusability, temperature and longer contact time should be further investigated to improve the adsorption efficiency of the material.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author gratefully acknowledges financial support for the senior project of the undergraduate student from the Faculty of Veterinary Technology, KASETSART University.

REFERENCES

Abdel, J. N. and S. Al-Asheh. 2009. Factorial Design for the Analysis of Packed-Bed Sorption of Copper Using Eggshell as a Biosorbent **Journal of environmental protection science** 3: 133-139.

Ahmad, M., S. Ahmed, B. Swami and S. Ikram. 2015. Adsorption of Heavy Metal Ions: Role of Chitosan and Cellulose for Water Treatment **International Journal of Pharmacognosy** 2: 280-289.

Hara, T., S. Makino, Y. Watanabe, T. Ikegami, K. Cabrera, B. Smarsly and N. Tanaka. 2010. The Performance of Hybrid Monolithic Silica Capillary Columns Prepared by Changing Feed Ratios of Tetramethoxysilane and Methyltrimethoxysilane **Journal of Chromatography A** 1217: 89–98.

Insuan, W., P. Khawmodjod, H.J. Whitlow, P. Soonthondecha, F. Malem and O. Chienthavorn. 2016. High-Throughput and Low-Cost Analysis of Trace Volatile Phthalates in Seafood by Online Coupling of Monolithic Capillary Adsorbent with Gc-Ms **Journal of agricultural and food chemistry** 64: 3287-3292.

Kobayashi, H., C. Smith, K. Hosoya, T. Ikegami and N. Tanaka. 2002. Capillary Electrochromatography on Monolithic Silica Columns **Analalytical Science** 18: 89-92.

Kobayashi, H., T. Ikegami, H. Kimura, T. Hara, D. Tokuda and N. Tanaka. 2006. Properties of Monolithic Silica Columns for Hplc **Analytical Sciences** 22: 491-501.

Lee, J.Y., C.H. Chen, S. Cheng and H.Y. Li. 2016. Adsorption of Pb(Ii) and Cu(Ii) Metal Ions on Functionalized Large-Pore Mesoporous Silica **International Journal of Environmental Science and Technology** 13: 65-76.

Lei, D., Q. Zheng, Y. Wang and H. Wang. 2015. Preparation and Evaluation of Aminopropyl-Functionalized Manganese-Loaded Sba-15 for Copper Removal from Aqueous Solution **Journal of environmental sciences (China)** 28: 118-127.

Malkoc, E. and Y. Nuhoglu. 2006. Removal of Ni(Ii) Ions from Aqueous Solutions Using Waste of Tea Factory: Adsorption on a Fixed-Bed Column **Journal of hazardous materials** 135: 328-336.

Namera, A. and T. Saito. 2013. Advances in Monolithic Materials for Sample Preparation in Drug and Pharmaceutical Analysis **TrAC Trends in Analytical Chemistry** 45: 182-196.

Namera, A., A. Nakamoto, T. Saito and S. Miyazaki. 2011. Monolith as a New Sample Preparation Material: Recent Devices and Applications **Journal of Separation Science** 34: 901-924.

Nema, T., E.C.Y. Chan and P.C. Ho. 2014. Applications of Monolithic Materials for Sample Preparation **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis** 87: 130-141.

Rita, S.,R Eti,and K Tetty. 2018. Aminopropyltrimethoxysilane (APTMS) Modified Nano silica As Heavy Metal Iron (Fe) Adsorbents in Peat Water **AIP Conference Proceedings 2014** 020163-1.

Tu, S., F. Lv, P. Hu, Z. Meng, H. Ran and Y. Zhang. 2015. Preparation of Amine-Modified Silica Foams and Their Adsorption Behaviors toward Tnt Red Water **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 481: 493-499.

Walcarius, A. and M.M. Collinson. 2009. Analytical Chemistry with Silica Sol-Gels: Traditional Routes to New Materials for Chemical Analysis **Annual Review of Analytical Chemistry** 2: 121-143.

Zvinowanda, C.M., J.O. Okonkwo, P.N. Shabalala and N.M. Agyei. 2009. A Novel Adsorbent for Heavy Metal Remediation in Aqueous Environments **International Journal of Environmental Science & Technology** 6: 425-434.

Investigation into the Effect of Colicin N on Cancer Cell Lines

Jesada Pitchayakorn[1], Chayada Intasuk[1], Runglada Jiraratmetagon[1], Kanokpol Apicho[1], Panuwat Lerdvorasap[1], Naray Pewnim[2] and Wanatchaporn Arunmanee[1,3*]

ABSTRACT

Cancer is considered as one of the life-threatening diseases and the number of the patients tend to increase every year. Nowadays, cancer treatments are still not effective for several types of cancers and the side effects of those treatments also lower patients' quality of life. Therefore, alternative cancer treatments must be urgently discovered and developed. Previous studies have found that colicins, the pore-forming proteins produced by *E. coli*, exhibit clear antimicrobial activity. Furthermore, pore-forming colicins has also been found to kill many types of cancer cells. The objective of this study is to investigate cytotoxicity and selectivity of colicin N in cancer cells. Here we expressed the protein using *E. coli* BL21-AI as a host cell then purified the protein using an affinity chromatography. The cytotoxicity tests of rat pancreatic cancer cell line (AR42J) and human stomach cancer cell line (NCI-N87) were done by MTT (3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-Diphenyltetrazolium Bromide) assay with protein concentrations at 0.5, 5, and 50 μM for 24 hours. To confirm the results of MTT assay of AR42J and NCI-N87, cell staining assay by Hoechst 33342 and propidium iodide with 50 μM of protein for 30 minutes and 24 hours was also conducted. The MTT assay results showed the increase of cell viability as 304.75% in AR42J and 224.08% in NCI-N87 at 50 μM of protein.

Key words: bacteriocins, cancers, pore-forming proteins

* Corresponding author; e-mail address: wanatchaporn.a@chula.ac.th

[1] Department of Biochemistry and Microbiology, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

[2] Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[3]Vaccines and Therapeutic Proteins Research Group, the Special Task Force for Activating Research (STAR), Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

INTRODUCTION

Cancer is one of the leading causes of death worldwide. Ferlay *et al.* reported that in 2012, 8.2 million people died from cancer (Ferlay *et al.*, 2013). Among the available cancer treatments such as chemotherapy, surgery, chemotherapy and radiation therapy, the most effective therapeutic approach is chemotherapy. Although chemotherapy is widely used for cancer treatments, chemotherapeutic agents are not specific to cancer cells and leads to harmful side effects in patients. Furthermore, cancer cells can develop resistance to the current chemotherapeutic agents by increasing their expression of drug detoxifying enzymes and drug transporters or can repair DNA defects to stop apoptosis (Raguz and Yaguee, 2008). Thus, the development of better cancer therapy by improving specificity to cancer cells and reducing side effects is urgently needed.

Recently, in order to combat cancer more effectively and selectively, immunotoxins have been developed. The immunotoxin molecule is composed of antibodies and cytotoxic compounds and its antibody targets specific outer membrane proteins of cancer cells. It enters cells by endocytosis and kills cancer cells with small-molecule drugs radionucleotides or protein toxins, that serve as cytotoxic agents (Pastan *et al.*, 2007). Previously, plant and bacterial toxins invading eukaryotic cells were attached to cell-targeting agents such as antibodies, cell-binding hormones, or growth factor ligands in order to act as specific cancer therapies. It was found that these agents had a high toxic effect on normal cells and caused immunogenicity. To overcome these drawbacks, the cytotoxic agents of immunotoxins need to be mild and not toxic to human cells.

Colicin is a bacteriocin produced and secreted by *Escherichia coli (E. coli)* in order to kill susceptible gram-negative bacteria and could potentially be exploited as a milder toxin against cancer cells. It has been reported that colicins, especially pore-forming colicins, possess anticancer activities against several cancer cell lines such as breast cancer, bone cancer and colon cancer (Kaur and Kaur, 2015). Additionally, colicins have shown selective activity towards cancer cells as colicins are more toxic to tumor cells than to normal cells (Lancaster *et al.*, 2007). In this study, we explored the possibility of using colicin N (ColN), a pore-forming colicin, as a cancer therapeutic agent. ColN is less immunogenic than other pore-forming colicins because of its comparatively smaller size (Vetter *et al.*, 1998). Its cationic character enables it to strongly interact with anionic lipopolysaccharides on bacterial cell surfaces (Johnson *et al.*, 2014), and it is more likely that ColN binds strongly to the negatively charged cell surface of cancer cells. Furthermore, ColN will be utilized as a model to study how other pore-forming colicins target and interact with cancer cells as it is still unclear if their mechanisms of action in cancer cells are similar to those of gram-negative bacteria. The knowledge gained from this study will support the development and design of anticancer colicins as alternatives to conventional cancer therapeutic drugs.

MATERIALS AND METHODS

1. Expression of his-tagged ColN

ColN with a C-terminal His-Tagged (-SSHHHHHH) was expressed from *E. coli* BL21-AI (Invitrogen™) with the plasmid pET3a (Sigma-Aldrich). Selected transformed cells from overnight cultures were grown at 37 °C in LB (Luria-Bertani) mediums containing 100 µg/ml ampicillin (PanReac AppliChem ITW Reagents). At OD_{600} = 0.6, L-arabinose was added to the cell cultures to a final concentration of 0.2% (w/v) and cells were then grown for a further 3 h. To harvest cells, the cell culture was centrifuged for 10 min at 8,000 g at 4°c.

2. Purification of his-tagged ColN

The cell pellet harvested by centrifugation was resuspended in a column loading buffer (50 mM sodium phosphate buffer, pH 8.0, 300 mM NaCl, 10 mM imidazole) and then disrupted by sonication on ice for 15 min. To remove unbroken cells and cell debris, the resulting suspension was centrifuged at 17,000 g at 4°c. The clarified supernatant was then loaded on to a Ni-NTA (nickel nitrilotriacetic acid) column (GE Healthcare Technologies) previously equilibrated in the column loading buffer. The removal of non-specifically bound proteins was done by washing the column twice with Ni column wash buffer (50 mM sodium phosphate, pH 8.0, 300 mM NaCl, 25 mM imidazole). Bound protein was eluted using buffer containing 250 mM imidazole collecting 5 ml fractions. Protein containing fractions were then dialysed twice against phosphate buffer saline pH 7.4. The antibacterial activity of ColN against *E. coli* was tested and the correct folding of ColN at 1.2 mg/ml of ColN in 50 mM sodium phosphate, 300 mM NaCl, pH 7.4 was assessed by a J-815 circular dichroism (CD) spectrophotometer (JASCO). The antimicrobial activity of ColN at different amount against *E. coli* NCTC 10538 were tested by agar overlay technique.

3. Cell viability

MTT assays are performed to evaluate the efficacy of ColN. The rat pancreatic cancer cell line (AR42J), human stomach cancer cell line (NCI-N87) and human endothelial vein cell line (EA.hy926) (ATCC) were grown in Ham's F-12K (Kaighn's) medium (Gibco™, Thermo Fisher Scientific) with 20% fetal bovine serum (FBS), Roswell Park Memorial Institute (RPMI) 1640 medium (Gibco™, Thermo Fisher Scientific) with 10% FBS and DMEM (Gibco™, Thermo Fisher Scientific) with 10% FBS, respectively. Cells were then seeded at 10,000 cells/well in a 96-well-plate (Corning) in 100 µL of culture medium and incubated at 37 ˚c. After incubation for 24 h, ColN at 0.5, 5 and 50 µM in phosphate buffer saline pH 7.4 were added to complete the cell culture medium. Cells were further incubated with ColN for 24 h. Then, an MTT solution (0.5 mg/ml) (Sigma-Aldrich) was added to each well and incubated for 3 h at 37˚C. The resulting formazan was solubilized in absolute ethanol (Merck). The absorbance of the dye was measured at 595 nm by a microplate reader (Anthros, Durham, NC, USA). The absorbance

values of colicin-treated cells were compared with those of untreated cells. This resulted in % cell viability which was calculated by equation 1. The mode of cell death was determined by co-staining cells with Hoechst33342/propidium iodide (Sigma-Aldrich). Apoptotic cells with condensed chromatin and/or fragmented nuclei are bright blue fluorescent cells due to Hoechst33342 staining whereas necrotic cells emit red fluorescence resulted from PI-staining.

$$\%\text{cell viability} = \frac{A_{595}\,\text{sample} - A_{595}\,\text{blank}}{A_{595}\,\text{control} - A_{595}\,\text{blank}} \times 100 \qquad \text{(equation 1)}$$

4. Antimicrobial test by agar overlay technique

Antimicrobial test of recombinant ColN were performed using agar overlay techniques which was previously described in Hockett and Baltrus, 2017. Briefly, a single colony of *E. coli* NCTC 10538 was grown in 5 ml of LB media overnight at 37 ^{o}C. The overnight culture was then diluted at 1/100 into fresh LB and incubated for 3-4 h. 100 µL of bacterial culture was inoculated into the 3 mL of soft agar (0.7% (w/v) agar in ultrapure water). The resulting mixture was poured onto solidified LB agar plates. Once overlay agar solidified, 2 µL of recombinant ColN in phosphate buffered saline pH 7.4 were spotted onto the overlay. The plates were incubated overnight at 37 ^{o}C prior to observe clear zones.

RESULTS AND DISCUSSION

The pET3a plasmid containing a *ColN* gene with C-terminal histidine tag was expressed in *E. coli* BL21-AI and then purification of recombinant ColN was achieved by immobilized metal affinity chromatography. The chromatogram as shown in Figure 1A exhibited that recombinant ColN was bound to the column and the eluted in the second peak (EF) when increasing the concentration of imidazole (dash line). The protein containing fractions were then further investigated using SDS-PAGE. The SDS-PAGE analysis in Figure 1B indicated that the bands corresponding the size of ColN (40 kDa) were observed in crude supernatant and eluted fraction (EF) only. The single band of ColN in eluted fractions revealed that most contaminants were removed by the purification. Therefore, pure recombinant ColN were successfully expressed using *E. coli* BL21-AI as a host.

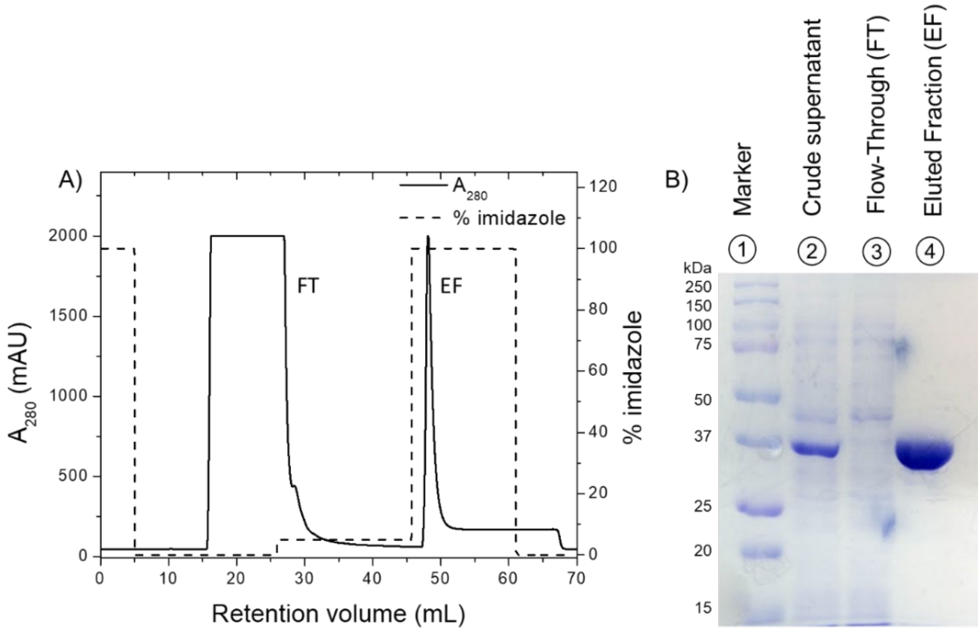


Figure 1 Purification of ColN with c-terminal histidine tag by affinity chromatography. A) Elution profile (line) of the 1-mL a HisTrap™ HP affinity column. ColN were eluted by 250 mM imidazole. B) SDS-PAGE analysis of protein-containing fractions from affinity chromatography.

To confirm that intact ColN was expressed and functioned, the samples of ColN were then further investigated by Circular Dichroism (CD) and antibacterial activity assay. Figure 2A illustrated the far-UV CD spectra of recombinant ColN in 50 mM sodium phosphate, 300 mM NaCl, pH 7.4. The high-resolution structure of ColN (PDB code:1A87) possessed a 10 α-helical bundle together with β-sheet. The comparison of this CD spectra with the previous report spectra (Evans *et al.,* 1996) showed the same pattern of spectra with 2 peaks at 210 and 220 nm hence expressed ColN were folded in the buffer solution as expected. This is in a good agreement with antibacterial activity data by agar overlay technique. ColN at different amount, ampicillin (positive control) and PBS (negative control) were spotted onto the lawn of *E. coli* NCTC 10538 on LB agar plate. After overnight incubation, the clear zones at the spots of ColN were observed as *E. coli* was killed by ColN in a dose-dependent manner. The diameters of observed clear zones from lowest to highest amount of ColN were increased from 14.5 mm to 17.5 mm.

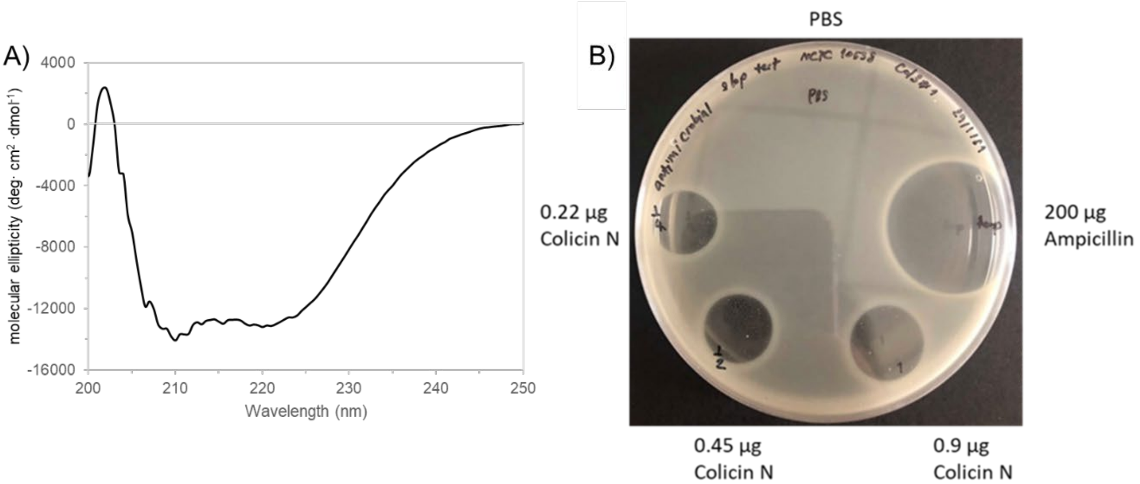


Figure 2 Recombinant ColN possessed the correct secondary structure and antibacterial activity. A) Far-UV CD spectra of recombinant ColN were performed at 25^{o}C using a circular cuvette of 0.01 cm path length and protein concentrations of 1.2 mg/ml. B) Clear zones on the lawn of *E. coli* NCTC 10538 indicated antibacterial activity of recombinant ColN.

The rat pancreatic cancer cell line (AR42J) and human stomach cancer cell line (NCI-N87) were chosen to be the models for the testing of ColN efficacy against cancers. These types of cancers are difficult to treat as these cancers are normally diagnosed at advanced stages (Oberstein and Olive, 2013). MTT assay was carried out to observe the cytotoxicity of ColN towards these cell lines (Figure 3A). A 24 h incubation with 0.5 – 50 µM of ColN, the mean cell viability observed in AR42J cells increased when comparing to non-treated control. In NCI-N87 cells, a slight decrease in the mean cell viability was observed at 0.5 and 5 µM of ColN whereas the incubation of 50 µM ColN increaed the mean cell viability. EA.hy926 cells, human umbilical vein endothelial cell line, were selected as a representation of normal cells for ColN cytotoxicity test. However, ColN seemed not to be sensitive to EA.hy926 cells as the mean cell viability did not change much even at the highest concentration of ColN. The ColN solution was also tested with MTT reagent and it did not react with this reagent (data not shown). This indicates that ColN may be more selective towards cancer cell lines used in this study in the stimulating manner. The electrostatic interaction between cationic ColN and net negative charge of cancer cell membrane could be a factor for ColN selectivity because cationic peptides have been shown to be selective to cancer cells (Schweizer, 2009). This is an interesting initial result which warrants further investigation.

Nuclear co-staining using Hoechst 33342 and propidium iodide (PI) allowed the quantification of cells and determination of % apoptosis induction by colicin N (50 µM) for 30 min and 24 h (Figure 3B and C) compared to non-treated control and positive control (triton-X). Triton X was used as a control

because ColN has been reported to cause bacterial cell killing by pore formation on the bacterial membrane. Triton X is a detergent which can solubilise the membrane of cancer cells in the same manner as ColN. At the specified dose, ColN treatment did not form the pores or affect cancer cell membrane in both AR42J and NCI-N87 cells. Only cells in Triton-X treated group were visualized to be permeable to red PI staining which can be interpreted as the leakage of cell membrane. In the case of Hoechst 33342 nuclear staining, all groups except the positive control exhibited the blue staining only. This also confirmed that the cell membrane were still intact.

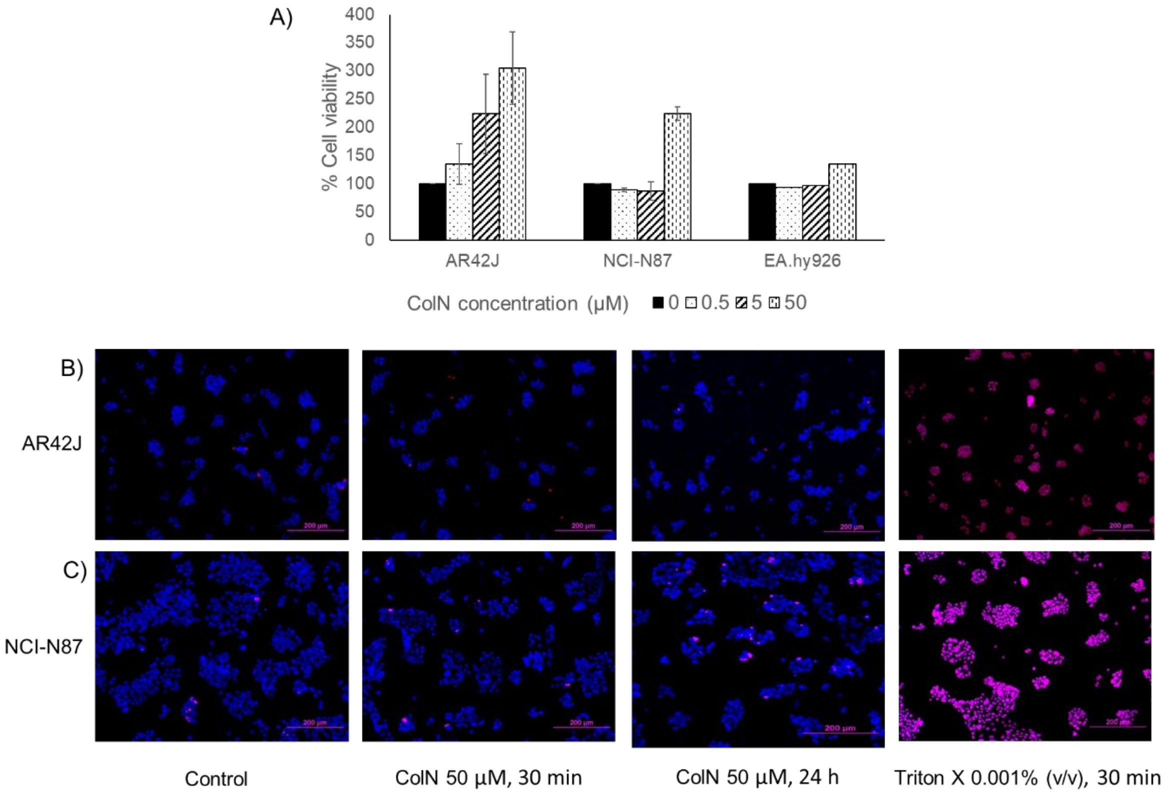


Figure 3 Recombinant ColN increased %cell viability in cancer cells but not normal cells A) MTT assay results for AR42J, NCI-N87 and EA.hy926 cells. B and C) Cell death detection by nuclear co-staining.

CONCLUSION

Recombinant ColN with C-terminal His-tag exhibited antibacterial activity which can effectively kill *E. coli*. However, the effect of this protein on rat pancreatic (AR42J) and human stomach (NCI-N87) cancer cells was still inconclusive. ColN was shown to increase cell viability in both AR42J and NCI-N87 cancer cell lines, but this elevation of cell viability could have resulted from either cell proliferation or increased metabolic activity. Further studies are required to confirm this phenomenon especially for colon cancer cells since ColN can also be produced from *E. coli* localized in the human colon and, therefore, can have an impact on colon cancer cell viability as well.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from new DPST Scholar Fund in 2016 by The Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology, IPST.

REFERENCES

Evans, L., S. Labeit, A. Cooper, L. Bond, and J. Lakey. 1996. The central domain of colicin N possesses the receptor recognition site but not the binding affinity of the whole toxin, **Biochemistry** 35: 15143-15148.

Ferlay, J., I. Soerjomataram, M. Ervik, R. Dikshit, S. Eser, C. Mathers and et al. 2013. Cancer ıncidence and mortality worldwide: IARC cancer base No.11.

Hockett, K.L. and D.A. Baltrus. 2017. Use of the soft-agar overlay technique to screen for bacterially produced ınhibitory compounds. **J. Vis. Exp.** 119, e55064

Johnson, C.L., H. Ridley, R. Marchetti, A. Silipo, D.C. Griffin, L. Crawford, B. Bonev, A. Molinaro and J.H. Lakey, 2014. The antibacterial toxin colicin N binds to the inner core of lipopolysaccharide and close to its translocator protein, **Molecular Microbiology** 92: 440-452.

Kaur, S. and S. Kaur. 2015. Bacteriocins as potential anticancer agents. **Front Pharmacol** 6: 272.

Lancaster, L. E., W. Wintermeyer and M.V. Rodnina. 2007. Colicins and their potential in cancer treatment, **Blood Cells Mol Dis** 38: 15-18.

Oberstein, P.E. and K.P. Olive. 2013. Pancreatic cancer: Why is it so hard to treat?, **Therap Adv Gastroenterol** 6: 321-37.

Pastan, I., R.Hassan, D.J. FitzGerald and R.J. Kreitman. 2007. Immunotoxin treatment of cancer. **Annu Rev Med** 58: 221-37.

Raguz, S. and E. Yaguee, 2008. Resistance to chemotherapy: New treatments and novel insights into an old problem. **British Journal of Cancer** 99: 387-391.

Schweizer, F. 2009. Cationic amphiphilic peptides with cancer-selective toxicity. **Eur J Pharmacol** 625:190-194.

Vetter, I.R., M.W. Parker, A.D. Tucker, J.H. Lakey, F. Pattus and D. Tsernoglou. 1998. Crystal structure of a colicin N fragment suggests a model for toxicity. **Structure** 6: 863-874.

การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อจัดการข้อมูลพืชยึดดิน

Information System Development for Managing Soil Stabilization Plants

จารุณี พิทยานิวิฏฐ์[1] อุษา สัมมาพันธ์[1] อภินิติ โชติสังกาศ[2] และ วรากร ไม้เรียง[2]

Jarunee Phittayanivit[1], Usa Sammapun [1], Apiniti Jotisankasa[2] and Warakorn Mairaing[2]

บทคัดย่อ

การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อจัดการข้อมูลพืชยึดดิน มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นระบบต้นแบบสำหรับรวบรวมและจัดการจำแนกข้อมูลต่างๆ ในการสำรวจพันธุ์พืชที่ใช้ในการป้องกันดินถล่ม การพัฒนาระบบนี้ ได้แบ่งเป็น ระบบข้อมูลพันธุ์พืช ระบบสำรวจราก ระบบพืชสมาชิก ระบบจัดการของผู้ดูแลระบบ มีฟังก์ชันการทำงาน คือ การเพิ่ม ลบ แก้ไข ค้นหา ออกรายงานในรูปแบบ PDF และ Excel คำนวณค่า และแสดงผลบนแผนที่ โดยระบบนี้ได้พัฒนา เป็นรูปแบบของเว็บแอปพลิเคชัน ด้วยภาษา PHP ร่วมกับระบบฐานข้อมูล MySQL และใช้ CodeIgniter เป็น framework มีส่วนการแสดงผลบนแผนที่ในการแสดงระดับความปลอดภัยของพื้นที่โดยมีน้ำฝนเป็นปัจจัยสำคัญ งานระบบการแสดงระดับความปลอดภัยบนแผนที่นี้ เป็นการประมาณค่าเบื้องต้นเพื่อแสดงประสิทธิภาพของพืชในการป้องกันดินถล่มให้เห็นภาพและเข้าใจง่าย หากผู้ใช้ต้องการทราบค่าความปลอดภัยแน่นอนของพื้นที่นั้นสามารถใช้ระบบคำนวณค่า Factor of Safety (FS) เพื่อหาค่าความปลอดภัยตามระดับความลึกของพื้นที่ได้

ABSTRACT

The objective of this study is to develop an information system for managing soil stabilization plants by collecting and managing various data types in the survey of plant species used to protect landslides. This system is divided into a plant data system, a root survey system, a member plant system and system administrator's management. The main functions of the system are to add, delete, edit, report in PDF and Excel format and calculate and display on the map. This system is developed as a web application with PHP language in combination with MySQL database system and using CodeIgniter as a framework. This system also displays preliminarily safety levels on a map to visualize the effectiveness of plants in protecting landslides by rainy so it is easy to understand. If the user wants to know the exact safety value of that area, the Factor of Safety (FS) calculation system can be used to find safety values based on the depth of the area.

Key words: CodeIgniter, plant, landslides, Factor of Safety (FS)

* Corresponding author; e-mail address: jarunee.ph@ku.th

[1]ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Computer Science, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัญหาดินถล่ม เป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สร้างความเสียหายให้กับพื้นที่สูงชันหรือพื้นที่เชิงเขาอย่างต่อเนื่องทุกปี ประเทศไทยมีพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาดินถล่มมาแล้วมากกว่า 500,000 ไร่ คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 1,000 ล้านบาท และยังมีผู้บาดเจ็บและเสียชีวิตมากมาย (กรมทรัพยากรธรณี, 2555) ซึ่งดินถล่มมีสาเหตุเกิดขึ้นทั้งจากธรรมชาติหรือจากการกระทำของมนุษย์ที่มีผลทำให้ดินและสภาพแวดล้อมของดินมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเกิดฝนตกหนักหากไม่มีต้นไม้ใหญ่ที่จะยึดดินไว้จะมีโอกาสเกิดดินถล่มได้ (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2559) ซึ่งอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ คือ ความลาดชัน ชนิดของหิน การใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน ระดับความสูง ลักษณะเนื้อดิน และปริมาณน้ำฝน เป็นต้น (สุทธิศักดิ์ และคณะ, 2551)

ปัจจุบันการป้องกันดินถล่ม ถูกแบ่งออกเป็น 3 แนวทางหลัก คือ (1) ทางวิศวกรรม โดยการใช้สิ่งก่อสร้าง (2) ทางชีววิศวกรรมโดยการใช้สิ่งก่อสร้างและพืชพรรณร่วมกัน และ (3) ทางวิธีชีวภาพ หรือการปลูกต้นไม้ทดแทน (สุทธิศักดิ์ และคณะ, 2551) โดยเฉพาะการป้องกันแก้ไขปัญหาดินถล่มด้วยการปลูกต้นไม้ จัดเป็นวิธีที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เพราะสามารถดำเนินการได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด โดยรากต้นไม้ที่ปลูกนั้นจะช่วยยึดเกาะดิน เพิ่มความแข็งแรงของดิน กิ่งก้านใบช่วยปกคลุมดิน ลดแรงกระทบของเม็ดฝน ป้องกันหน้าดินกะเทาะส่วนต่าง ๆ ของพืชช่วยดูดซับน้ำ กำลังของรากในการยึดดินจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะอายุของต้นไม้ที่เพิ่ม ส่วนการใช้สิ่งก่อสร้างทางวิศวกรรมยิ่งนานวันยิ่งมีกำลังรับน้ำหนักเสื่อมสภาพลงไปตามเวลา และต้องใช้ความรู้เฉพาะทางในการก่อสร้าง อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการซื้อวัสดุ ก่อสร้าง และบำรุงรักษา จึงเลือกใช้การปลูกต้นไม้ เพื่อช่วยในการเพิ่มแรงของการยึดดิน และรักษาเสถียรภาพของลาดดินให้มั่นคงได้ (อนุสรณ์, 2542; มรรษมนต์, 2561)

ถึงแม้ว่า ปัจจุบันประเทศไทยจะมีการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลพรรณพืชชนิดต่าง ๆ ที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันดินถล่ม ในหลายรูปแบบ เช่น การขุดสำรวจราก การวิเคราะห์กำลังของรากพืชชนิดต่าง ๆ การจำแนกรูปทรงของรากพืช การมีบทบาทของพืชต่อเสถียรภาพลาดดิน การประเมินค่าความแข็งแรงของรากพืชแต่ละรูปแบบ วิธีการปลูกพืชยึดดินทางวิศวกรรม เป็นต้น แต่องค์ความรู้และข้อมูลที่นักวิจัยได้สำรวจแล้วนั้น ยังไม่ได้มีการจำแนกและรวบรวมไว้อย่างเป็นระบบจึงทำให้บุคคลทั่วไปเข้าถึงข้อมูลได้ยาก (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2559)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อจัดการข้อมูลพืชยึดดิน เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นการรวบรวมและจัดการจำแนกข้อมูลต่าง ๆ ในการสำรวจพันธุ์พืชในประเทศไทยที่ใช้ในการป้องกันดินถล่ม โดยจะเป็นฐานข้อมูลเก็บรวบรวมการสำรวจของนักวิจัย และบุคคลทั่วไปสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่าย และใช้ประโยชน์ในด้านการแนะนำเลือกพันธุ์พืชปลูกป้องกันดินถล่มในเบื้องต้นให้เหมาะสมกับพื้นที่ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การรวบรวมข้อมูลพันธุ์พืชยึดดิน

ข้อมูลหลักของการสำรวจและศึกษาพืชยึดดินได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาการป้องกันแก้ไขดินถล่มบนที่สูงชันตามแนวพระราชดำริ (มูลนิธิชัยพัฒนา) ระหว่างปี พ.ศ. 2556-2559 (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2559) ซึ่งเป็นข้อมูลปฐมภูมิที่ทางโครงการ ฯ สำรวจรากพืชยึดดินและรวบรวมเอาไว้ โดยตรวจสอบพันธุ์พืชกับทางนักวิจัยท้องถิ่นของโครงการ ฯ และได้ข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ปริญญาโท เรื่อง การ

เสริมแรงของรากในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม พื้นที่ศึกษา ลุ่มน้ำแม่พร่อง-แม่พูล และลุ่มน้ำคลองคราม (มรรษมนต์, 2561)

การคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อจัดการข้อมูลพืชยึดดิน นำสมการคำนวณค่า Factor of safety (F) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (อภินิติ, 2556) ใช้ในระบบโดยใช้ข้อมูลจากระบบพืชสมาชิกได้แก่ ค่าความเชื่อมแน่นของดิน ค่าความหนานแน่นของราก ความชันของพื้นที่ ปริมาณน้ำฝนสะสม ของสมาชิกมาคำนวณค่าความปลอดภัยของพื้นที่ของสมาชิก โดยแสดงผลบนแผนที่ตามระดับสีความปลอดภัย จากสูตร

$$F = \frac{C' + C_r + \gamma Z \cdot \cos^2\beta \tan\emptyset' - \mu_w \tan\emptyset''}{\gamma Z \sin\beta \cos\beta}$$

เมื่อ

C' = ค่าความเหนียวหรือค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Effective cohesion)

C_r = ค่าความเชื่อมประสานกับราก (Root cohesion)

$\emptyset'$ = ค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (Effective angle of shearing resistance)

μ_w = แรงดันน้ำระหว่างช่องว่างในดิน (Pore water pressure)

$\emptyset''$= มุมกำลังเฉือนของดินเนื่องจากแรงดัน เป็นฟังก์ชันกับแรงดันน้ำและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ *(*Degree of saturation: S) เมื่อ $\mu_w > 0$, ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ $\emptyset''$ = $\emptyset'$ หรือเมื่อ $\mu_w < 0$, ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ $\emptyset''$ = $\sim\tan^{-1}($ $S_r tan\,\emptyset')$ หรือได้จากการทดสอบดินไม่อิ่มตัวซึ่งสามารถวัดหรือควบคุมค่าแรงดันน้ำที่ติดลบ (เรียกว่าค่า Suction*)*

γ = หน่วยน้ำหนักรวมของดิน (Total unit weight of soil)

Z = ความลึกของระนาบไถลจากผิวดิน สำหรับการเลื่อนไถลแบบระนาบ

β = ความชันของลาดและระนาบวิบัติ เพื่อใช้หาค่าความปลอดภัยของพื้นที่

การออกแบบฐานข้อมูล

รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ (1) ข้อมูลพืชยึดดิน ได้แก่ ชื่อสามัญ ชื่อวิทยาศาสตร์ ชื่อท้องถิ่น ชนิดพืช ประเภทต้นไม้ การใช้ประโยชน์ ความลาดชันของพื้นที่ซึ่งพืชสามารถเจริญเติบโตได้ ระดับแสงที่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของพืช อัตราการเจริญเติบโต สีดอก ประเภทใบเลี้ยง ประเภทดินที่เหมาะสมในการปลูก ลักษณะของรากและการเสริมแรงกำลังรับแรงดึงของราก ดัชนีรากแนวดิ่ง ดัชนีรากแนวนอน ความชัน รูปแบบรากตามการเสริมแรง ลักษณะพื้นที่ที่พบ บทบาทของพืชในการป้องกันดินถล่ม วิธีการขยายพันธุ์ ข้อมูลทั่วไป การใช้ประโยชน์ในอดีต รวมทั้งบันทึกภาพต้นไม้ (2) ข้อมูลการสำรวจราก ได้แก่ รูปทรงราก ลักษณะรากพืช การจัดกลุ่มพืช สถานที่สำรวจ รวมทั้งบันทึกภาพลักษณะราก และ (3) ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าความปลอดภัย ได้แก่ ค่าความเชื่อมแน่นของดิน ค่าความหนานแน่นของราก ความชันของพื้นที่ ปริมาณน้ำฝนสะสม โดยนำข้อมูลข้างต้นมาจัดสร้างระบบการจัดการข้อมูล และจัดทำระบบสมาชิก จากนั้นวิเคราะห์และออกแบบระบบฐานข้อมูลและความสัมพันธ์ของข้อมูล (Figure 1)

การพัฒนาระบบ

พัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อจัดการข้อมูลพืชยึดดิน เป็นรูปแบบของเว็บแอปพลิเคชัน ด้วยภาษา PHP ร่วมกับระบบฐานข้อมูล MySQL และใช้ CodeIgniter เป็น framework ซึ่งรองรับโครงสร้างตามหลักการ Model-View-Controller (MVC) ที่ระบบจะแยกส่วนประมวลผล ออกจากส่วนแสดงผล และใช้ Bootstrap กลุ่มของคำสั่งช่วยจัดรูปแบบหน้าตาของเว็บไซต์เพื่อติดต่อกับผู้ใช้งานได้ง่าย ออกแบบโครงสร้างเว็บแอปพลิเคชันแบบ Responsive Web Design ให้ใช้งานได้เหมาะสมกับทุกขนาดหน้าจอ มีฟังก์ชันหลักที่ใช้ในการพัฒนาระบบคือ การเพิ่ม ลบ แก้ไข ค้นหา ออกรายงานในรูปแบบ PDF และ Excel คำนวณค่า และแสดงผลบนแผนที่ และระบบสมาชิกที่ได้มีการกำหนดสิทธิ์ ใช้งานจัดการข้อมูลของพืช

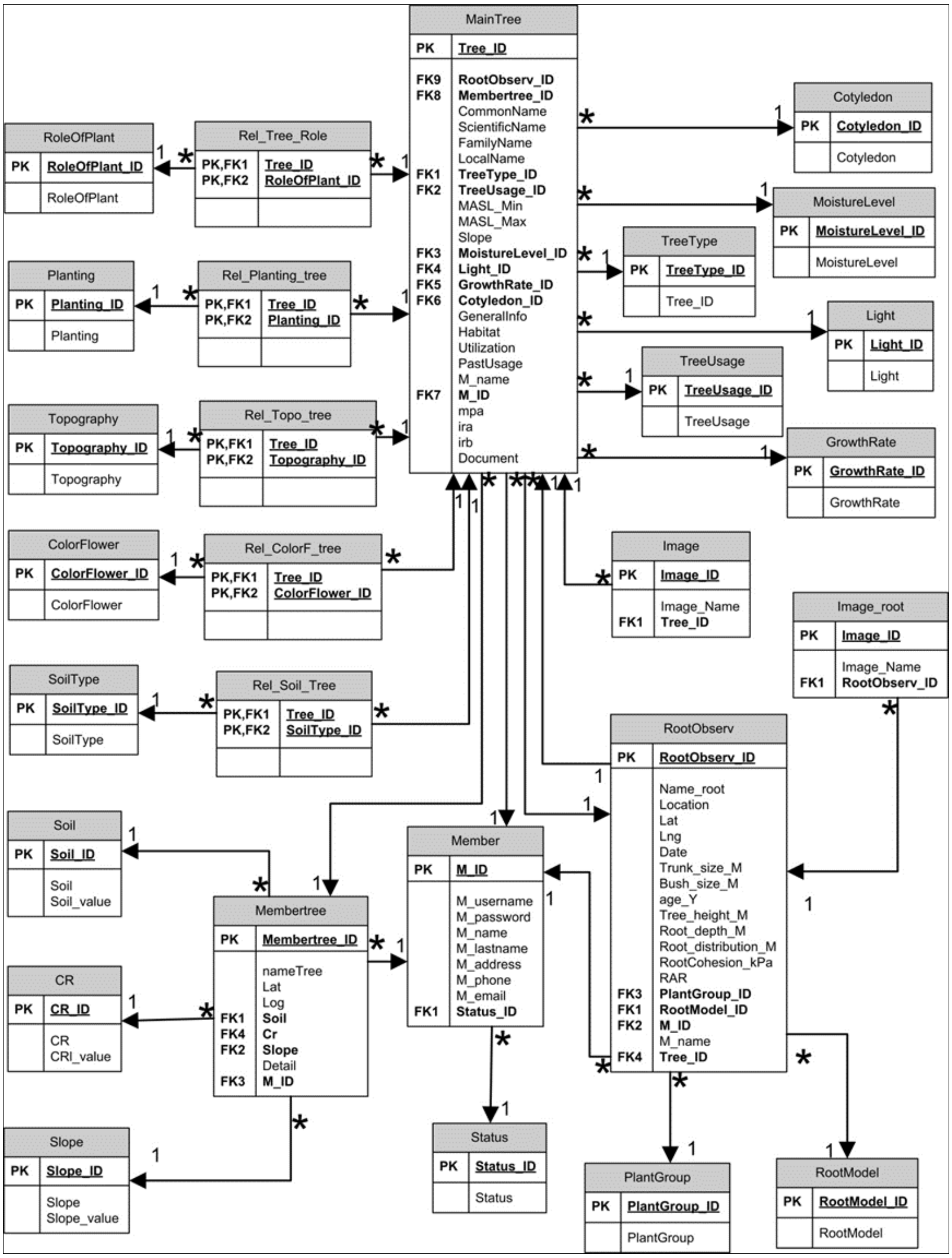


Figure 1 Entity Relationship Diagram (ER)

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการพัฒนาเว็บแอพพลิเคชั่นระบบสารสนเทศเพื่อจัดการข้อมูลพืชยึดดิน พบว่าเว็บแอพพลิเคชั่นที่จัดทำขึ้นมีความสามารถในการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพืชยึดดิน ข้อมูลสำรวจรากพืช และข้อมูลค่าความปลอดภัยจากดินถล่มให้อยู่ในแหล่งข้อมูลเดียวกัน และสามารถค้นหาข้อมูลตามประเภทของข้อมูลต้นไม้ที่ต้องการได้อย่างสะดวกและรวดเร็วกว่าแหล่งข้อมูลที่ถูกเก็บอยู่ในรายงาน ซึ่งเป็นประโยชน์กับการจัดการปลูกพืชยึดดินเพื่อป้องกันหรือแก้ไขการเกิดปัญหาดินถล่มในพื้นที่เสี่ยงภัยได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นหน้าเว็บแอพพลิเคชั่นยังแสดงผลในด้านประโยชน์การใช้งานอื่น ๆ ของต้นไม้ชนิดนั้น รวมทั้งเก็บรวบรวมบทความที่เกี่ยวข้องของต้นไม้ชนิดนั้นไว้ด้วย ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลและดาวน์โหลดข้อมูลได้ (Figure 2)

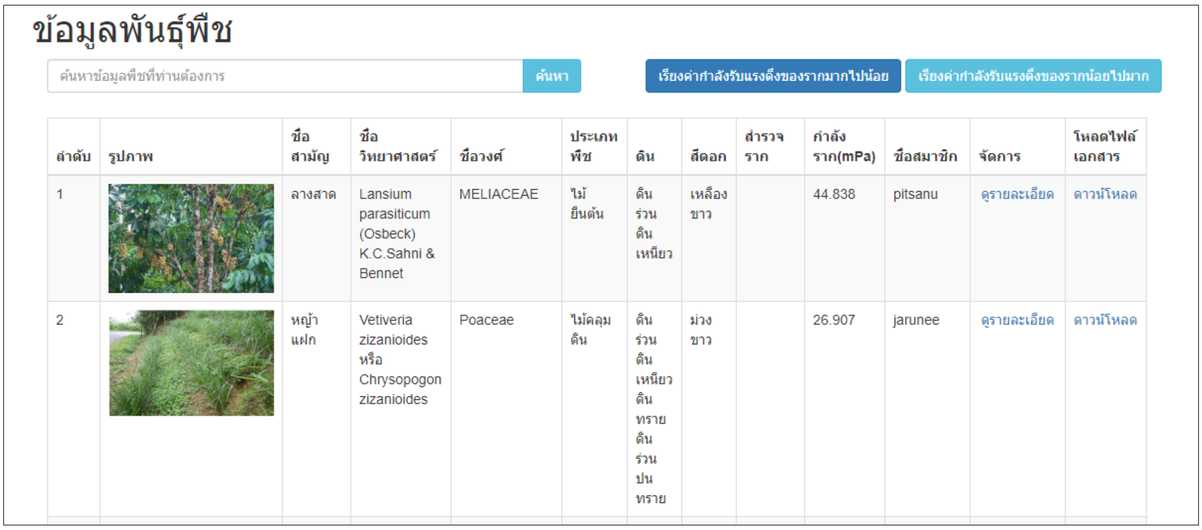


Figure 2 Web application home page of Soil Stabilization Plants.

การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อจัดการข้อมูลพืชยึดดินนี้ยังเป็นระบบต้นแบบ ข้อมูลที่ใช้กำหนดเกณฑ์ของระดับความปลอดภัยดินถล่มจึงเป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้น ปริมาณน้ำฝนซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญและตรวจวัดได้ง่ายในพื้นที่ จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ทำให้ผู้ใช้ระบบทราบถึงความปลอดภัยพอสังเขป (Figure 3) หากผู้ใช้ต้องการทราบค่าความปลอดภัยที่แน่นอนควรใช้ระบบคำนวณค่าความปลอดภัยตามความลึกของดิน (Figure 4) โดยตัวเลขที่จะใส่ในช่องแบบฟอร์มควรเป็นค่าที่ได้สำรวจความชันของพื้นที่ที่แน่นอน ขุดสำรวจรากไม้ และเก็บตัวอย่างดิน มาทดสอบหาค่าที่ใช้ในการคำนวณจากห้องปฏิบัติการ แล้วจึงนำมาเข้าสมการในระบบคำนวณ จะทำให้ผลการคำนวณแม่นยำขึ้น (อภินิติ, 2556)

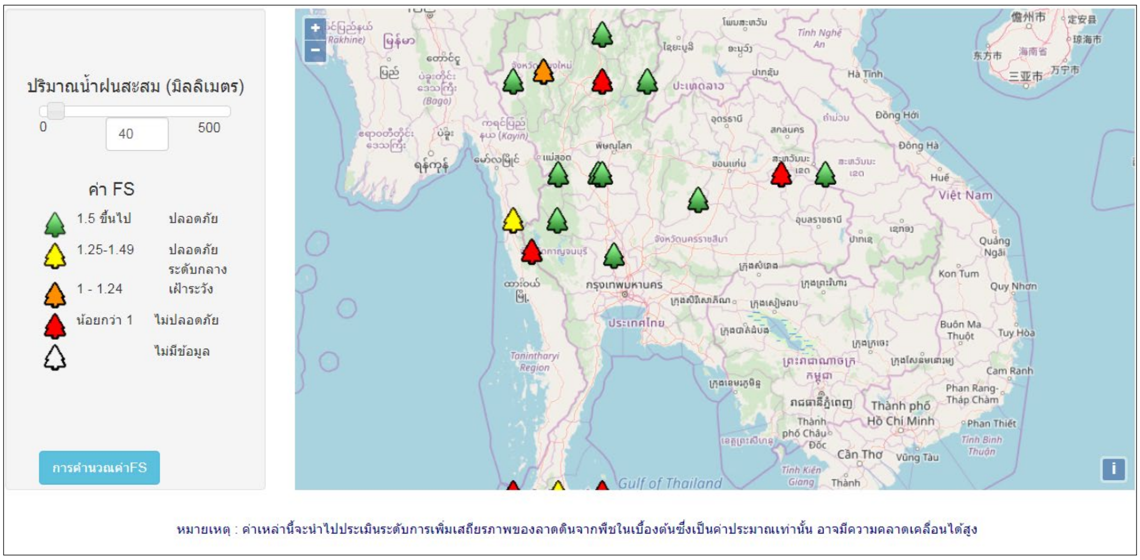


Figure 3 Safety level of land slide calculated by different precipitation levels.

Figure 4 Factor of safety calculation system

การสำรวจรากพืชยึดดินของแต่ละโครงการมียังรูปแบบการเก็บข้อมูล วิธีการสำรวจและทดสอบค่าที่แตกต่างกัน ทำให้ข้อมูลไม่สามารถเชื่อมโยงกันทำให้ยากต่อการนำไปพัฒนาระบบเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ หากต่อไปในอนาคต มีรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลและความต้องการใช้งานข้อมูลในส่วนใดที่ชัดเจนขึ้น ก็จะสามารถออกแบบและพัฒนาระบบให้เกิดประโยชน์มากที่สุดกับผู้ใช้ระบบเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกพันธุ์พืชและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อป้องกันชีวิตและทรัพย์สินจากภัยดินถล่มได้

สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อจัดการข้อมูลพืชยึดดิน ช่วยให้นักวิจัยด้านพืชยึดดินมีระบบจัดเก็บข้อมูลพันธุ์พืชยึดดินและใช้จัดเก็บข้อมูลการสำรวจรากพืชยึดดิน ซึ่งจะใช้เป็นฐานข้อมูลในการศึกษาต่อไป อีกทั้ง

ระบบนี้ยังช่วยเผยแพร่ข้อมูลให้ผู้ใช้ระบบเข้าถึงข้อมูลการวิจัยทางด้านพืชยึดดิน สามารถค้นหาข้อมูลพืชยึดดินเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกปลูกพืชเพื่อป้องกันดินถล่ม และทำให้ทราบถึงระบบความปลอดภัยจากดินถล่มของพื้นที่ได้ในเบื้องต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาการป้องกันแก้ไขดินถล่มบนที่สูงชันตามแนวพระราชดำริ (มูลนิธิชัยพัฒนา) ระหว่างปี พ.ศ. 2556-2559 และขอขอบคุณ ผศ.อธิราช หนูสีดำ สำหรับคำแนะนำและการให้ความช่วยเหลือ

เอกสารอ้างอิง

มรรษมนต์ เอกจิต. 2561. **การเสริมแรงของรากในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม พื้นที่ศึกษา ลุ่มน้ำแม่พร่อง-แม่พูล และลุ่มน้ำคลองคราม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มูลนิธิชัยพัฒนา. 2559. **โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาการป้องกันแก้ไขปัญหาดินถล่มบนที่สูงชันตามแนวพระราชดาริ: การศึกษาแบบจาลองทางวิศวกรรมปฐพีเพื่อการทานายการเกิดดินถล่มในพื้นที่ลาดชัน**. หจก. พรีวัน, กรุงเทพฯ.

สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ อภินิติ โชติสังกาศ บรรพต กุลสุวรรณ มนันยา จันทศร ดำรงค์ ปิ้งสุวรรณ สิริศาสตร์ ยังแสนภู วรวัชร์ ตอวิวัฒน์ และจิตติมา เทพพาณิช. 2551. **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาพฤติกรรมการเกิดน้ำท่วม-ดินถล่มในพื้นที่ต้นแบบเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับกำหนดเกณฑ์และวิธีการในการเตือนภัย**. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรธรณี. 2555. **บันทึกเหตุการณ์ดินถล่ม** (Online). http://www.dmr.go.th/download/Landslide/event_landslide1.htm, 11 ธันวาคม 2559.

อนุสรณ์ ทองสร้อย. 2542. **การประเมินความปลอดภัยและวางแผนบำรุงรักษาเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีสภาพ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อภินิติ โชติสังกาศ. 2556. **ชีววิศวกรรมปฐพี เพื่อควบคุมการชะล้างพังทลายของลาดและดินถล่ม.** หจก. พรีวัน, กรุงเทพฯ.

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

Subject: Engineering and Architecture

ภาคบรรยาย
Oral Presentation

KASETSART UNIVERSITY

อิทธิพลของสารเชื่อมขวาง มวลโมเลกุลของไคโตซาน และการใช้สารลดแรงตึงผิวต่อการสังเคราะห์อนุภาคไคโตซานด้วยวิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน

Effect of Cross-linker, Molecular Weight Chitosan, and Surfactant Use on Synthesis of Chitosan Beads using Water-in-oil Emulsion Technique

ปิติภาคย์ บุญมี[1] และ นันทิยา หาญศุภลักษณ์[1,2*]

Pitipak Boonmee[1] and Nanthiya Hansupalak[1,2*]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานคือศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารเชื่อมขวาง (Glutaraldehyde และ Epichlorohydrin) มวลโมเลกุลของไคโตซาน (มวลโมเลกุล 10k และ 500k) และการเติมสารลดแรงตึงผิว ต่อการสังเคราะห์อนุภาคไคโตซานด้วยวิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคไคโตซานที่เตรียมขึ้น ผลการทดลองพบว่าสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมคือ Glutaraldehyde เพราะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง ไคโตซานมวลโมเลกุลสูงสามารถใช้เตรียมอนุภาคได้ แต่การลดปริมาณลงด้วยการเพิ่มปริมาณไคโตซานมวลโมเลกุลต่ำ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่อนุภาคไคโตซานโดยมีลักษณะเป็นเม็ดสมบูรณ์มากขึ้น แต่ส่งผลให้มีการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคมากขึ้น ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าการหลอมรวมตัวกันนี้สามารถลดลงได้ด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไป

ABSTRACT

This work focused on examining effects of cross-linker type (glutaraldehyde and epichlorohydrin), molecular weight of chitosan (10k and 500k), and surfactant addition on the production of chitosan beads using water-in-oil emulsion technique. Scanning electron microscopy was used for morphology study. The results showed that the suitable cross-linker was glutaraldehyde because chitosan was in fine powder form. High MW chitosan could form beads, yet the partial replacement of the high MW chitosan with the low MW chitosan could strengthen the beads, leading to more intact beads. The addition of low MW chitosan, however, induced bead aggregation. The results proved that the aggregation was lessened by the surfactant addition.

Key words: chitosan beads, water-in-oil emulsion, cross-linker, surfactant

* Corresponding author; e-mail address: fengnyh@ku.ac.th

[1]ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวัสดุยางและพอลิเมอร์เพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรม ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Specialized center of Rubber and Polymer Materials in Agriculture and Industry (RPM), Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สกัดได้จากเปลือกของสัตว์ทะเลจำพวก กุ้ง และปู สามารถนำมาใช้งานได้อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านการแพทย์ เภสัชกรรม สิ่งแวดล้อม การเกษตร และอุตสาหกรรม ซึ่งคุณสมบัติที่เด่นชัดของไคโตซานคือ ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ และสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ (สุธิดา, 2552) โดยไคโตซานสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านเภสัชกรรม และการแพทย์ได้ในการนำมาผลิตเป็นวัสดุห่อหุ้มสารสำคัญในทางการแพทย์ หรือเรียกว่า “อนุภาคไคโตซาน” ซึ่งอนุภาคไคโตซานที่จะใช้ในการห่อหุ้มสารสำคัญนั้น ควรมีขนาดไม่เกิน 300 ไมโครเมตร (Lengyel *et al.*, 2019)

ในการผลิตอนุภาคไคโตซานนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี ทั้งวิธี Ionic gelation ที่ใช้การหยดไคโตซานลงในสารละลายเชื่อมขวางไอออนิก เพื่อฟอร์มตัวให้เกิดอนุภาคไคโตซานขึ้นในขณะที่มีการกวนผสมอยู่ตลอดเวลา ซึ่งสารที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Prasertkittikul *et al.*, 2013) และ โซเดียมไตรโพลิฟอสเฟส (Sadhasivam *et al.*, 2015) หรืออีกวิธีหนึ่งคือ วิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน โดยการใช้น้ำมันเป็นตัวอิมัลชั่นกับสารละลายไคโตซานเพื่อให้เกิดเป็นอนุภาคไคโตซาน แล้วจึงทำการล้างน้ำมันออก โดยต้องทำการทดลองในอ่าง Sonicate และใช้ 4-blade stirrer ช่วยในการกวนผสมสาร เนื่องจากสารค่อนข้างมีความหนืดสูง และใช้การเหวี่ยงเพื่อแยกของแข็ง ออกจากสารละลาย (Dozie-Nwachukwu *et al.*, 2017) นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นๆ ที่สามารถทำอนุภาคไคโตซานได้ เช่น Spray drying และ Precipitation (น้อย, 2556) แต่ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้วิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน ในการทำอนุภาคไคโตซานเนื่องจากอนุภาคไคโตซานที่ได้ มีขนาดอยู่ในช่วงไมครอน สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และนอกจากนี้ยังต้องการศึกษาการใช้สารเชื่อมขวางที่เหมาะสมในการทดลองนี้ด้วย

โดยสารเชื่อมขวางนั้น ช่วยในการให้อนุภาคไคโตซานมีความแข็งแรงมากขึ้น ไม่สลายตัวง่ายโดยตัวแรกคือ Glutaraldehyde ซึ่งปฏิกิริยาของไคโตซานกับหมู่อัลดีไฮด์ จะเกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์กับกลุ่มอะมิโนของไคโตซาน ซึ่งการเชื่อมขวางของพันธะโควาเลนต์ช่วยให้เกิดการก่อตัวของอนุภาคได้มากขึ้น และยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของอนุภาคเช่นกัน (Dozie-Nwachukwu *et al.*, 2017) ถัดมาคือ Epichlorohydrin ซึ่งทำการเชื่อมขวางกับหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซาน ซึ่งเป็นสารเชื่อมขวางที่ดีในวิธี Ionic gelation (Prasertkittikul *et al.*, 2013) ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน จึงสนใจที่จะศึกษาว่าการใช้ Epichlorohyrin เป็นสารเชื่อมขวางนั้นเหมาะสมกับวิธีนี้ด้วยหรือไม่

ในงานวิจัยก่อนหน้า (Dozie-Nwachukwu *et al.*, 2017) ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน นั้นสามารถขึ้นรูปอนุภาคไคโตซานได้ ซึ่งได้ทำการเปลี่ยนแปลงแค่ความเข้มข้นของยาที่ใส่ลงไปในอนุภาคไคโตซานเท่านั้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาปัจจัยอื่นเพิ่มเติม นั่นคือการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนมวลโมเลกุลของไคโตซาน โดยคาดว่าอิทธิพลของอัตราส่วนมวลโมเลกุลไคโตซานที่ใช้นั้น สามารถทำให้เกิดความแตกต่างของขนาดอนุภาคไคโตซานได้ และนอกจากนี้ยังศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเติมสารลดแรงตึงผิว เพื่อช่วยในการลดการหลอมรวมตัวกันของกลุ่มอนุภาคไคโตซานให้มีการกระจายตัวมากยิ่งขึ้น โดยใช้สาร Sodium dodecyl sulfate(SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิว

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดสารเชื่อมขวาง (Glutaraldehyde และ Epichlorohydrin) อิทธิพลของมวลโมเลกุลของไคโตซาน (10k และ 500k) และการใช้สารลดแรงตึงผิวในการ

เตรียมอนุภาคไคโตซานด้วยวิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน ซึ่งต้องการให้อนุภาคมีอยู่ในช่วง 200 – 500 ไมโครเมตร

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและสารเคมี

ไคโตซานชนิดผงมวลโมเลกุล 10,000 และ 500,000 กรัมต่อโมล ซื้อจาก บริษัท ต้าหมิงเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร กรดอะซิติก(glacial) n-hexane(99%) และ Acetone ได้จาก RCI labscan limited (Thailand) Paraffin liquid และ Tween 20 ได้จาก Ajax Finechem Epichlorohydrin และ Sodium dodecyl sulfate(SDS) ได้จาก Sigma-aldrich ส่วน Glutaraldehyde ได้จาก LOBA Chemie

การเตรียมอนุภาคไคโตซาน

เตรียมสารละลายไคโตซานเข้มข้น 2.5% ในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 2% ปริมาตร 12 มิลลิลิตร จากนั้นหยดสารละลายนี้ลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายParaffin liquid (ที่มี Tween20 ความเข้มข้น 0.5% ผสมอยู่) ในอัตรา 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที กวนผสมที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาทีพร้อมกับการใช้คลื่นเสียง หลังจากหยดสารละลายไคโตซานเสร็จ 20 นาที จึงหยดสารเชื่อมขวาง และกวนผสมต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกชั้นด้วยความเร็ว 8900 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนที่เป็นของแข็งมาล้างด้วย n-hexane ตามด้วย Acetone และน้ำปราศจากประจุ จากนั้นนำไปอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเก็บใส่ภาชนะบรรจุเพื่อรอการทดสอบ ในการศึกษานี้จะใช้ไคโตซานมวลโมเลกุลต่างกันมาผสมกันในอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง 0–100 และกำหนดให้น้ำหนักของผงไคโตซานรวมคงที่เท่ากับ 0.3 กรัมในทุกการทดลอง

การวิเคราะห์อนุภาคไคโตซาน

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และขนาดของอนุภาคไคโตซาน ทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope) แล้ววัดหาขนาดด้วยโปรแกรม ImageJ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ชนิดสารเชื่อมขวาง

ในการศึกษานี้ได้ใช้สารเชื่อมขวาง 2 ชนิด คือ Glutaraldehyde และ Epichlorohydrin เพื่อต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดเป็นอนุภาคของไคโตซานด้วยวิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน โดยปริมาณของสารเชื่อมขวางทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ในการศึกษาเท่ากัน คือ 3 6 และ 9 มิลลิลิตร พบว่าการใช้ Glutaraldehyde เป็นสารเชื่อมขวางนั้นสามารถทำให้เกิดอนุภาคไคโตซานแขวนลอยในตัวกลาง เมื่อนำไปอบแห้งจึงได้ลักษณะเป็นดัง Figures 1a–c กล่าวคือเป็นเม็ดสีน้ำตาลขนาดค่อนข้างใหญ่ มองเห็นด้วยตาเปล่า และมีรูปร่างหลากหลาย (Irregular shape) สีน้ำตาลเกิดจากสีของสาร Glutaraldehyde ที่มีสีเหลืองเข้ม การเติมสาร Glutaraldehyde ในปริมาณต่ำที่สุด ทำให้อนุภาคไคโตซานที่มีขนาดใหญ่ กระจายตัวเดี่ยวหรือเกาะกันเป็นก้อนอยู่ และมีสีน้ำตาลเข้ม (Figure 1a) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Glutaraldehyde ให้สูงขึ้นไป อนุภาคไคโตซานที่ได้เป็นผงขนาดเล็กที่มีสีน้ำตาลแดง และยังมีการเกาะกันเป็นก้อนแต่เป็นก้อนที่มีขนาดเล็ก (Figures 1b and c)

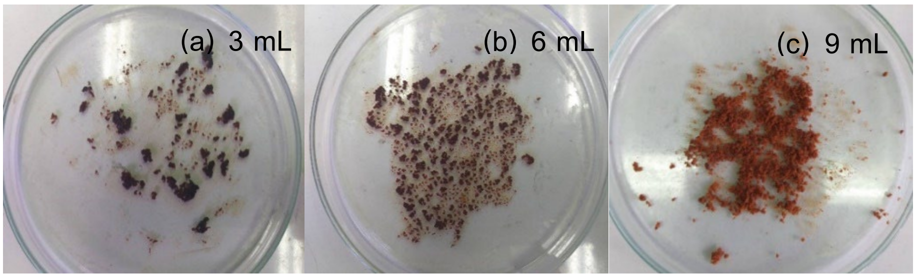


Figure 1 Chitosan beads prepared by using glutaraldehyde as a cross-linker in different amounts. (MW = 500k)

สำหรับการใช้ Epichlorohydrin เป็นสารเชื่อมขวางนั้น ก็พบว่าสามารถทำให้เกิดเป็นอนุภาคไคโตซานขนาดเล็กจำนวนมาก อนุภาคไคโตซานที่เกิดขึ้นมีสีขาว แขวนลอยอยู่ในตัวกลาง แต่เมื่อนำไปอบแห้ง ก็พบว่าอนุภาคไคโตซานเหล่านั้นหลอมรวมตัวเป็นแผ่นบางอยู่ในจาน ซึ่งแผ่นที่ได้มีลักษณะค่อนข้างใส มีสีเหลืองขุ่นในบางจุด และกรอบแห้ง ดังแสดงใน Figures 2a–c โดยจากการค้นคว้าเพิ่มเติมพบว่าปฏิกิริยาจะมีการเกิดกรดไฮโดรคลอริคทุก ๆ หน่วยไคโตซาน ซึ่งระบบของการศึกษานี้เป็นระบบน้ำมัน ทำให้กรดไฮโดรคลอริคไม่เกิดการแตกตัว จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาไม่สามารถดำเนินไปข้างหน้าได้ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่ต่ำกว่า Glutaraldehyde

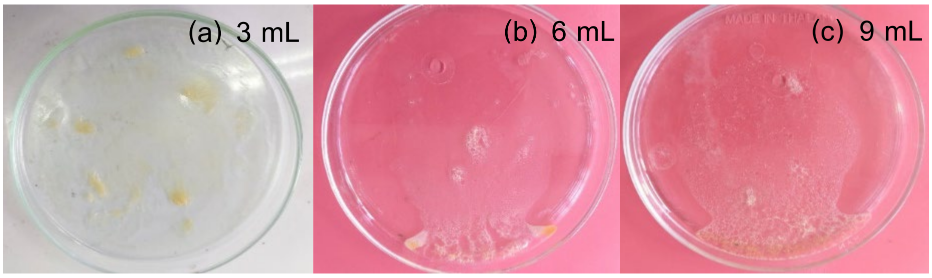


Figure 2 Chitosan beads using epichlorohydrin as a cross-linker in different amounts (MW = 500k).

จากผลที่ได้ในการศึกษาการใช้สารเชื่อมขวางทั้ง 2 ชนิดพบว่า สารเชื่อมขวางสำหรับการทำอนุภาคไคโตซานโดยใช้วิธีวิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน ที่เหมาะสมนั้น คือ Glutaraldehyde ซึ่งผู้วิจัยจะใช้ Glutaraldehyde เป็นสารเชื่อมขวางในการศึกษาปัจจัยถัดไป

อิทธิพลของมวลโมเลกุลของไคโตซานในการเตรียมอนุภาค

ในการศึกษานี้ เป็นการเตรียมอนุภาคด้วยวิธีเดียวกัน แต่เติมไคโตซานที่มีมวลโมเลกุล 10k ลงไปผสมกับไคโตซานมวลโมเลกุลสูง (500k) ในช่วง 0–100% โดยโมล และใช้ Glutaraldehyde เป็นสารเชื่อมขวาง นอกจากนี้ยังได้เตรียมอนุภาคจากไคโตซานมวลโมเลกุล 10k ล้วนด้วยเพื่อใช้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ

เมื่อพิจารณาความเร็วในการเกิดเป็นอนุภาคโดยเริ่มจับเวลาตั้งแต่หยดสารเชื่อมขวางลงไป พบว่าไคโตซานมวลโมเลกุลสูงใช้เวลานานที่สุดในการเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จนเห็นได้ด้วยตาเปล่า (20 นาที) แต่เมื่อใช้สารละลายที่ผสมไคโตซานที่มีมวลโมเลกุลต่างกัน หรือที่เตรียมจากไคโตซาน 10k ล้วนก็พบว่าใช้เวลา

ประมาณ 1 นาที ก็จะเห็นอนุภาคจำนวนมากมายเกิดขึ้น ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า ความเร็วของการเกิดเป็นอนุภาคที่มากขึ้นนี้เป็นผลจากไคโตซานสายโซ่สั้นที่เติมลงไปนั้นทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวางกับสายโซ่ต่างๆ ในระบบ

สำหรับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคที่เกิดขึ้น พบว่าเมื่อใช้เฉพาะไคโตซานที่มีมวลโมเลกุลสูงในการเตรียมอนุภาค (Figure 3a) ทำให้เกิดอนุภาคเดี่ยว และเกิดการรวมตัวของอนุภาคโดยที่ยังเห็นขอบเขตของแต่ละอนุภาคชัดเจน (Agglomeration) ยังไม่พบการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคเหล่านั้น ผิวภายนอกของอนุภาคเรียบเนียนคล้ายกับงานวิจัยของ Dozie-Nwachukwu *et al.* (2017) นอกจากนี้ยังพบรอยปริที่ผิวภายนอกของอนุภาคด้วย และอนุภาคจำนวนมากที่มีลักษณะแตกหัก ไม่สมบูรณ์

การนำไคโตซานที่มีมวลโมเลกุลต่ำมาผสมกับมวลโมเลกุลสูง (Figures 3b–d) ทำให้เกิดทั้งอนุภาคเดี่ยวและอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดจากการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็ก (Aggregation) ผิวภายนอกของอนุภาคที่ได้มีความขรุขระมาก กล่าวคือพบหลุมตื้นๆ กระจายหลายบริเวณ มีรอยปริเยอะขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ Figure 3a ก็พบว่าอนุภาคที่มีไคโตซานมวลโมเลกุลต่ำผสมด้วยนี้มีลักษณะสมบูรณ์เป็นจำนวนมาก (แตกหักน้อยลง) การเพิ่มจำนวนโมลของสายโซ่โมเลกุลต่ำมากขึ้นนี้ ไม่ได้ทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคไคโตซานแตกต่างอย่างชัดเจน (Figures 3b–d)

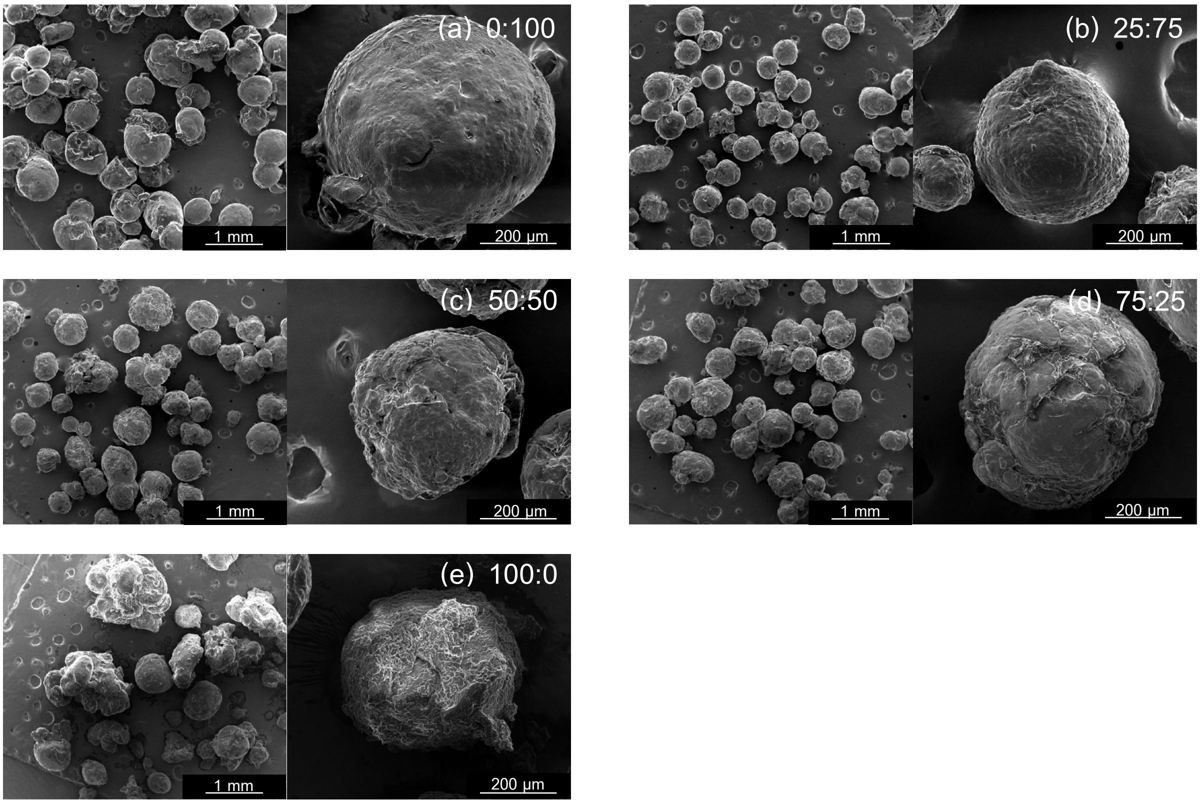


Figure 3 Effect of molecular weights (10k and 500k) of chitosan on morphologies of chitosan beads. X:Y indicates the mole ratio of 10k:500k.

สำหรับตัวอย่างที่เตรียมจากไคโตซานมวลโมเลกุลต่ำ 100% (Figure 3e) ก็พบว่ายังสามารถทำให้เกิดเป็นอนุภาคได้ โดยพบทั้งอนุภาคเดี่ยว และอนุภาคขนาดใหญ่ที่เป็นผลจากการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคเดี่ยว

(Aggregation) ทั้งนี้อนุภาคเดี่ยวที่พบนี้มีจำนวนน้อยกว่าตัวอย่างอื่นๆ โดยอนุภาคเดี่ยวส่วนใหญ่ได้หลอมรวมตัวกัน ผิวภายนอกของอนุภาคนูนเป็นแนวสันจำนวนมาก ส่งผลให้มีความขรุขระมากกว่าตัวอย่างที่มีไคโตซานมวลโมเลกุลสูงเป็นส่วนผสม (Figures 3a–d)

จาก Figures 4a–e พิจารณาจากอนุภาคไคโตซาน 24 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วน (กรณีที่อัตราส่วน 100:0 วัดได้เพียง 10 ตัวอย่าง) จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคเดี่ยวที่เตรียมจากไคโตซานที่มีอัตราส่วนโดยโมลของสายโซ่ที่มีมวลโมเลกุล 2 ขนาด มีค่าใกล้เคียงกัน การที่ไม่พบอิทธิพลของมวลโมเลกุลของไคโตซานต่อขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นนี้ อาจอธิบายได้ว่า ระยะเวลาที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมขวางนานพอจนทำให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ แต่หากใช้ระยะเวลาที่สั้นลง อาจเห็นอิทธิพลของมวลโมเลกุลต่อการเกิดอนุภาคไคโตซานได้ เพราะพฤติกรรมของสายโซ่ในสารละลายที่ต่างกัน โดยสายโซ่ยาวจะพันกันได้อย่างแข็งแรง ในขณะที่สายโซ่สั้นจะพันกันได้ไม่แข็งแรง (Rodriguez *et al.*, 2015) ดังนั้นขณะเกิดเป็นอนุภาค สายโซ่ยาวจะเคลื่อนที่ได้ไม่ดีนักเพราะเกิดการพันกันและเชื่อมขวาง ในขณะที่สายโซ่สั้นจะมีเพียงการเชื่อมขวางเท่านั้น ทำให้สายโซ่จำนวนหนึ่งยังคงสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ

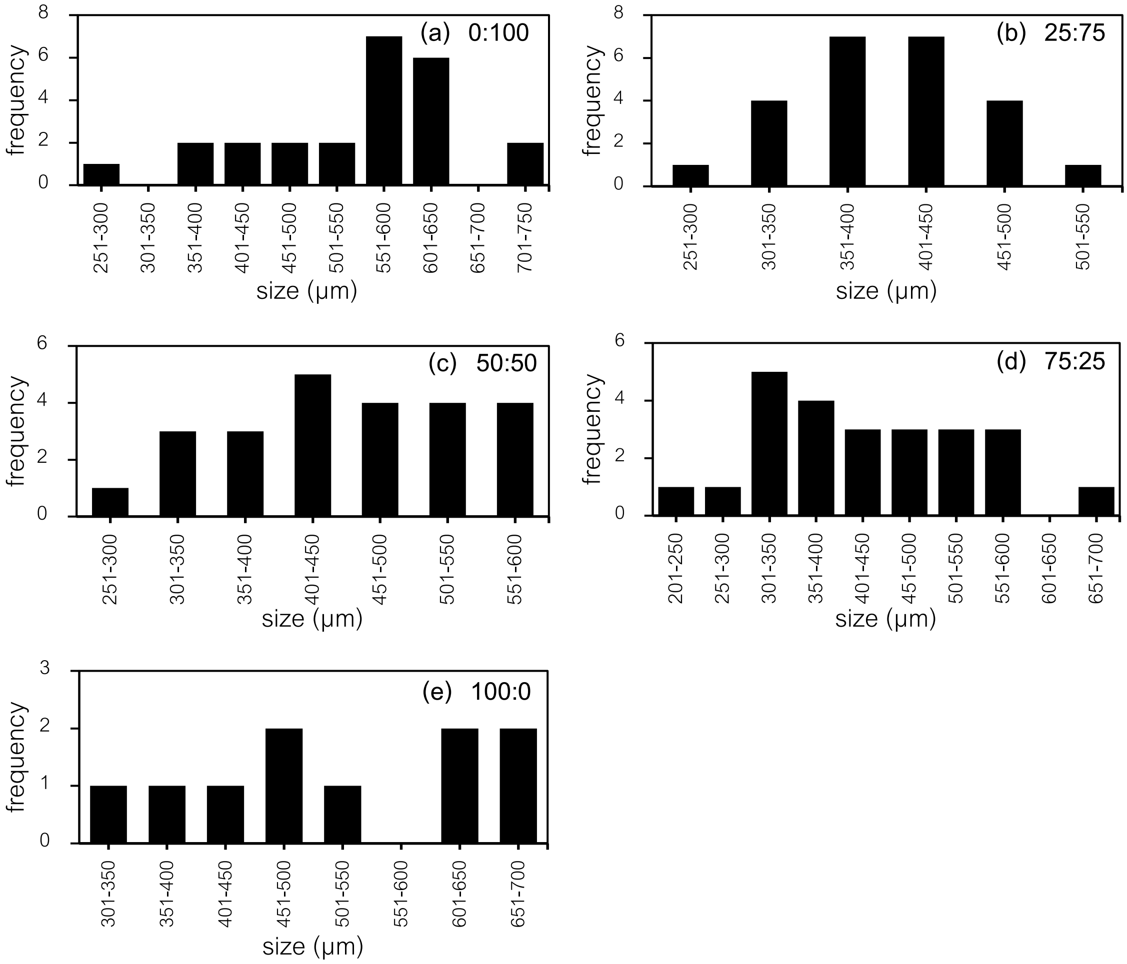


Figure 4 Size distribution of single chitosan beads prepared from chitosan having two different molecular weights (10k and 500k) in various mole ratios. X:Y indicates the mole ratio of 10k:500k.

อิทธิพลของสารลดแรงตึงผิว

แม้ว่าการเติมไคโตซานสายโซ่สั้นจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่อนุภาคไคโตซาน แต่มีข้อเสียคือทำให้เกิดการหลอมรวมตัวกันของอนุภาค ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สนใจศึกษาวิธีที่จะลดการเกิดปรากฏการณ์นี้ ด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิว ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นอนุภาคไคโตซานที่เตรียมจากไคโตซานมวลโมเลกุลต่ำ (10k) ล้วน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิว ที่เติมลงไปช่วยขัดขวางการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคเดี่ยวได้ เพราะพบอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดจากการหลอมรวมตัวน้อยลง ทั้งนี้พบการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคเดี่ยว (Figures 5a–c) การเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว จาก 5 มิลลิโมลาร์ เป็น 10 มิลลิโมลาร์ ให้ผลที่คล้ายคลึงกัน (Figures 5b and c)

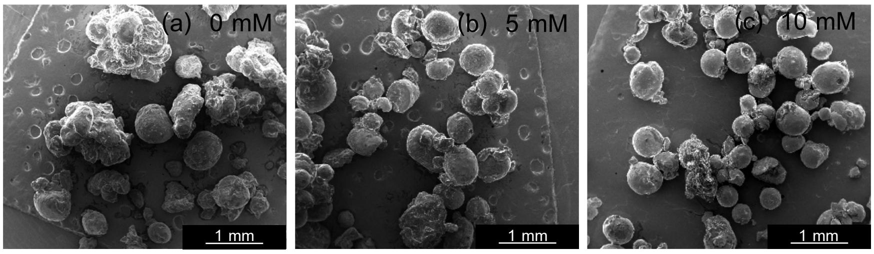


Figure 5 Effect of surfactant concentration on fabrication of chitosan beads (10k).

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถทำอนุภาคไคโตซานด้วยวิธีการอิมัลชั่นชนิดน้ำในน้ำมัน ได้ โดยการเลือกใช้สารเชื่อมขวางที่เหมาะสมคือ Glutaraldehyde เพียงชนิดเดียว ทั้งนี้ที่ปริมาตรของสารเชื่อมขวาง Glutaraldehyde 9 มิลลิลิตร ทำให้อนุภาคไคโตซานมีลักษณะเป็นผงมากที่สุด ส่วนอิทธิพลของมวลโมเลกุลไคโตซานนั้น พบว่าการเพิ่มปริมาณไคโตซานมวลโมเลกุลต่ำ และลดปริมาณไคโตซานมวลโมเลกุลสูง (น้ำหนักรวมของผงไคโตซานที่ใช้คงที่) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของอนุภาคได้ ทำให้รูปร่างสมบูรณ์ไม่แตกหัก นอกจากนี้ยังเพิ่มความเร็วในการเกิดเป็นอนุภาคด้วย แต่ทำให้เกิดการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคมากขึ้น ซึ่งสามารถลดได้ด้วยการใช้สารลดแรงตึงผิว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษาและทุนวิจัยบางส่วน สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับทุนวิจัย และขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวัสดุยางและพอลิเมอร์เพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรม (Specialized center of Rubber and Polymer Materials in agriculture and industry (RPM)) ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

น้อย เนียมสา. 2556. อนุภาคระดับไมโครของไคโตซานสำหรับใช้เป็นระบบนำส่งยาแบบควบคุมการปลดปล่อย. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา** 18 (2): 281-287.

สุธิดา คงทอง. 2552. ไคติน-ไคโตซาน. **วารสารอุตสาหกรรมศึกษา** 3 (1): 1-7.

Dozie-Nwachukwu, S.O., Y. Danyuo, J.D. Obayemi, O.S. Odusanya, K.Malatesta and W.O. Soboyejo. 2017. Extraction and encapsulation of prodigiosin in chitosanmicrospheres for targeted drug delivery. **Materials Science and Engineering C** 71: 268-278.

Lengyel, M., N. Kallai-Szabo, V. Antal, A. Jozsef Laki and I. Antal. 2019. Microparticles, Microspheres, and Microcapsules for Advanced Drug Delivery. **Scientia Pharmaceutica** 87: 1-31

Prasertkittikul, S., Y. Chisti and N. Hansupalak. 2013. Deproteinization of Natural Rubber Using Protease Immobilized on Epichlorohydrin Cross-linked Chitosan Beads. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 52: 11723-11731.

Rodriguez, F., C. Cohen, C.K. Ober and L.A. Archer. 2015. **Principles of polymer systems.** 6^{th} ed. CRC press, New York.

Sadhasivam, L., N. Dey, A. Prakash Francis and T. Devasena. 2015. Transdermal patches of chitosan nanoparticles for insulin delivery. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences** 7 (5): 84-88.

การผลิตอนุภาคโคคริสตัลของยาเมเฟนามิค แอซิดกับพาราเซตามอลและนิโคตินาไมด์ ด้วยกระบวนการ Gas Anti-Solvent (GAS)

Production of Mefenamic Acid-Nicotinamide-Paracetamol Cocrystals using Gas Anti-Solvent (GAS) Process

ตวงรัตน์ รวบรวม[1] และ มานพ เจริญไชยตระกูล[1*]

Tungrat Roubroum[1] and Manop Charoenchaitrakool[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตอนุภาคโคคริสตัลระหว่างยาเมเฟนามิค แอซิด (MEF) ร่วมกับนิโคตินาไมด์ (NIC) และพาราเซตามอล (PAR) ด้วยกระบวนการ Gas Anti-Solvent (GAS) เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการละลายของยา MEF โดยใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายและใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตเป็นตัวต้านการละลาย โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการละลายของยาเมเฟนามิค แอซิด ที่ 63.2% ($t_{63.2}$) ได้แก่ อุณหภูมิ (25-45 ^{o}C) อัตราส่วนโดยโมล MEF:NIC:PAR (1:3:3-1:5:5) และความเข้มข้นของยา (70-90% Sat MEF) และหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตอนุภาคโคคริสตัล โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ 25 ^{o}C อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง MEF:NIC:PAR เท่ากับ 1:4.8:4.8 และ 89.7% Sat MEF จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการละลายเร็วที่สุด โดยมีค่า $t_{63.2}$ เท่ากับ 4.19 นาที ซึ่งเร็วกว่าตัวยา MEF บริสุทธิ์ (68.75 นาที) และอนุภาคโคคริสตัลจากเทคนิคการระเหยตัวทำละลายออกช้าๆ (4.98 นาที)

ABSTRACT

In this study, Gas Anti-Solvent (GAS) technique was used to produce cocrystals of mefenamic acid (MEF), nicotinamide (NIC) and paracetamol (PAR) in order to improve dissolution rate of MEF. The GAS process was carried out using acetone as a solvent and carbon dioxide as an anti-solvent. The effect of temperature (25-40 ^{o}C), MEF-NIC-PAR molar ratio (1:3:3-1:5:5) and %Saturation of MEF (70-90%) on the required time to dissolve 63.2% of the drug ($t_{63.2}$) were investigated and the conditions of the GAS process were optimized to achieve the fastest dissolution time using the Box-Behnken design of experiments. At 25 ^{o}C, MEF-NIC-PAR ratio of 1:4.8:4.8, and 89.7% of MEF were found to be the optimal conditions for achieving the fastest dissolution time. The $t_{63.2}$ of the optimized GAS product was found to be 4.19 min which is faster than those of pure MEF (68.75min) and cocrystals by slow evaporation (4.98 min).

Key words: cocrystals, mefenamic acid, nicotinamide, paracetamol, Gas Anti-Solvent, Box-Behnken

* Corresponding author; e-mail address: **fengmnc@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ยาเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ซึ่งใช้สำหรับรักษาหรือป้องกันโรคต่างๆ ประสิทธิภาพการออกฤทธิ์ของยาขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการละลายและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของตัวยา ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ จึงมีการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพยาหลายวิธี ทั้งในทางกายภาพและทางเคมี เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของยา

ในปัจจุบันมากกว่า 40-60% ของยาที่จำหน่ายตามท้องตลาดเป็นยาที่ละลายน้ำได้น้อย (Shewale *et al.*, 2015) ส่งผลให้ยามีชีวปริมาณออกฤทธิ์ต่ำและมีประสิทธิภาพในการรักษาต่ำ การตกผลึกร่วม (Cocrystallization) เป็นหนึ่งในวิธีที่ช่วยเพิ่มอัตราการละลายของยา โดยนำมาผลิตเป็นอนุภาคโคคริสตัล ซึ่งเป็นการตกผลึกร่วมกันระหว่างตัวยากับโคฟอร์มเมอร์ โดยตัวยาและโคฟอร์มเมอร์มีการยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ข้อดีของวิธีนี้คือ ได้รูปแบบผลึกที่มีความเสถียร และอนุภาคโคคริสตัลมีความสามารถในการละลายที่ดีขึ้น การผลิตอนุภาคโคคริสตัลสามารถทำได้จากหลายวิธี เช่น การบดละเอียด การระเหยตัวทำละลายออกอย่างช้าๆ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีดังกล่าวจะมีข้อด้อยคือ ตัวยาที่ได้อาจเสื่อมสภาพทางความร้อนหรือทางเคมี ไม่สามารถควบคุมขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคได้ และมีการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในปริมาณที่มาก โดยในปัจจุบันมีการนำของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต (Dense gas) มาใช้ประโยชน์ ซึ่งของไหลส่วนใหญ่ที่นิยมใช้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีอุณหภูมิและความดันวิกฤตต่ำ ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ไม่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนของยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง

ในงานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการ GAS Anti-Solvent (GAS) มาใช้ผลิตอนุภาคโคคริสตัลระหว่างยาเมเฟนามิค แอซิด (Mefenamic acid, MEF) ร่วมกับยาพาราเซตามอล (Paracetamol, PAR) และนิโคตินาไมด์ (Nicotinamide, NIC) เพื่อเพิ่มอัตราการละลายของยาเมเฟนามิค แอซิด ซึ่งเป็นยาที่ละลายน้ำได้น้อย จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการเพิ่มอัตราการละลายของยาเมเฟนามิค แอซิด พบว่า มีงานวิจัยที่นำยาเมเฟนามิค แอซิด มาผลิตเป็นอนุภาคโคคริสตัลร่วมกับยาพาราเซตามอล (Wichianphong and Charoenchaitrakool, 2018a) และผลิตเป็นอนุภาคโคคริสตัลร่วมกับนิโคตินาไมด์ (Wichianphong and Charoenchaitrakool, 2018b) ด้วยกระบวนการ GAS อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ผลิตอนุภาคโคคริสตัลโดยใช้โคฟอร์มเมอร์ 2 ชนิดร่วมกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการเพิ่มอัตราการละลายของยาเมเฟนามิค แอซิดโดยใช้พาราเซตามอลและนิโคตินาไมด์เป็นตัวโคฟอร์มเมอร์ร่วมกัน ซึ่งโคฟอร์มเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่เอไมด์ และ หมู่ไฮดรอกซิล ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดเป็นโคคริสตัลได้ อีกทั้งยังศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการละลายของยาเมเฟนามิค แอซิด เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลาย อัตราส่วนระหว่างตัวยากับโคฟอร์มเมอร์ โดยใช้กระบวนการ GAS ซึ่งมีคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตเป็นตัวต้านการละลาย มาผลิตเป็นโคคริสตัล

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

ยาเมเฟนามิค แอซิด ($C_{15}H_{15}NO_2$, ความบริสุทธิ์ 98%, บริษัท Sigma), ยาพาราเซตามอล ($C_8H_9NO_2$, ความบริสุทธิ์ 98%, บริษัท Tokyo Chemical Industry), นิโคตินาไมด์ ($C_6H_6N_2O$, ความบริสุทธิ์ 99% บริษัท

Acros Organics), อะซิโตน (ความบริสุทธิ์ 99.5%, บริษัท Quality Reagent Chemical), คาร์บอนไดออกไซด์ (High purity grade, บริษัท TIG), น้ำ DI (De-ionization)

การเตรียมอนุภาคโคคริสตัลด้วยเทคนิคการระเหยตัวทำละลายออกช้า ๆ (Slow evaporation, SE)

ชั่งยา MEF, PAR และ NIC ตามสัดส่วนต่าง ๆ ตามที่ต้องการ ใส่ในอะซิโตน 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่อง Ultrasonicator เพื่อให้เกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ แล้วนำสารละลายที่ได้เทลงใน plate ปิดด้วยแผ่นฟิล์มที่ทำการเจาะรู 4-5 รู เพื่อปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยออกช้า ๆ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การตกตะกอนด้วยเทคนิค GAS

ละลายยาเมเฟนามิค แอซิด (MEF) ยาพาราเซตามอล (PAR) และนิโคตินาไมด์ (NIC) ในอัตราส่วนโดยโมลของ MEF:PAR:NIC ที่ต้องการ (1:3:3, 1:4:4, 1:5:5) ด้วยอะซิโตน 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่อง Ultrasonicator เพื่อให้เกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ แล้วนำสารละลายที่ได้มาบรรจุลงในห้องตกตะกอน (Precipitation chamber) ที่อยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ดังแสดงใน Figure 1 จากนั้นเติม CO_2 เข้าสู่ปั๊มความดันสูงทางวาล์ว V-1 เมื่ออุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ จะเริ่มกระบวนการโดยการป้อน CO_2 ที่อัตราการไหลคงที่ที่ 10 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าสู่ระบบโดยการเปิดวาล์ว V-2, V-3 และ V-4 เพื่อให้ CO_2 ไหลเข้าสู่ด้านล่างของห้องตกตะกอน ความดันเริ่มต้นที่ใช้เปิดเข้าสู่ระบบคือ 70 บาร์ เมื่อเพิ่มความดันของระบบขึ้นเรื่อยๆ ทำให้สารละลายภายในห้องตกตะกอนเกิดการขยายตัว ทำให้ความแข็งแรงของตัวทำละลายอินทรีย์ลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการทำละลายของตัวทำละลายอินทรีย์ลดลง ตัวถูกละลายจึงตกตะกอนออกมา เมื่อเพิ่มความดันระบบจนถึง 90 บาร์ ทำการล้างตัวทำละลายออกจากห้องตกตะกอนด้วยความดันคงที่ 90 บาร์ โดยการเปลี่ยนทิศทางชองวาล์ว V3 และ V-4 เพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของ dense CO_2 ให้ไหลเข้าทางด้านบนของ ห้องตกตะกอน โดยจะทำให้ตัวทำละลายถูกผลักออกทางวาล์ว V-4 และ V-5 ตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนการล้างตัวทำละลายนี้จะใช้ CO_2 ปริมาตร 80 มิลลิลิตร จากนั้นทำการลดความดันให้เข้าสู่บรรยากาศและเก็บผลิตภัณฑ์ในห้องตกตะกอนไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณยา MEF (%MEF content) วิเคราะห์อัตราการละลายด้วย Dissolution test วิเคราะห์การเกิดโคคริสตัลด้วย DSC และ FT-IR

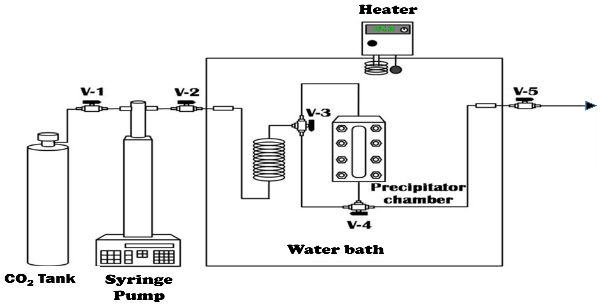


Figure 1 Schematic diagram of Gas Anti-Solvent cocrystallization apparatus.

งานวิจัยนี้ต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตอนุภาคโคคริสตัลระหว่างยาและโคฟอร์มเมอร์ ที่มีอัตราการละลายเร็วที่สุด โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ด้วยโปรแกรม MINITAB 17 โดยแต่ละตัวแปรมีระดับในการทดลองดัง Table 1 ซึ่งระดับของตัวแปรที่ศึกษาในงานนี้จะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wichianphong and Charoenchaitrakool (2018a) และ Wichianphong and Charoenchaitrakool (2018b)

Table 1 Factors and their levels in the GAS process.

Factors	Symbols	Uncoded levels		
		Low	Medium	High
Temperature (^{o}C)	T	25	35	45
MEF:NIC:PAR ratio	C	1:3:3	1:4:4	1:5:5
MEF saturation (%)	S	70	80	90

การวิเคราะห์หาปริมาณตัวยา MEF ในผลิตภัณฑ์ (%MEF content)

ชั่งสารตัวอย่าง 5 มิลลิกรัม จากนั้นละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.6 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (Genesys 10S, Thermo Scientific) ที่ความยาวคลื่น 335 นาโนเมตร และคำนวณ %MEF content ตามสมการที่ 1

$$\%\ \text{MEF content} = \frac{\text{mass of MEF in particles}}{\text{total mass of particles}} \times 100 \qquad (1)$$

การวิเคราะห์อัตราการละลายของยาด้วยวิธี Dissolution test

กวนสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.6 ปริมาตร 900 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง Magnetic stirrer ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที (rpm) ที่อุณหภูมิ 37 ^{o}C ซึ่งเป็นการจำลองอุณหภูมิภายในร่างกาย จากนั้นชั่งสารตัวอย่างที่มีปริมาณเทียบเท่ากับตัวยา MEF 5 มิลลิกรัม (สำหรับผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ GAS คำนวณได้จาก %MEF content ที่หาได้) จากนั้นเทสารตัวอย่างลงในสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมไว้และเก็บสารละลายครั้งละ 4 มิลลิลิตร ที่เวลาต่างๆ นำสารละลายที่เก็บได้มากรองด้วย Syringe filter ขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตัวยา MEF ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 335 นาโนเมตร ตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบอัตราการละลายคือ เวลาที่ใช้ในการละลายปริมาณยา MEF ได้เท่ากับ 63.2% ของปริมาณยา MEF ทั้งหมดที่ใส่ไป ($t_{63.2}$) โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ ค่า $t_{63.2}$ ในการเปรียบเทียบอัตราการละลาย ทั้งนี้เพราะ ค่า $\frac{1}{t_{63.2}}$ คือสัมประสิทธิ์อัตราการละลาย (Loth and Hemgesberg, 1986)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สนใจการเพิ่มอัตราการละลายของยา MEF ซึ่งเป็นยาที่ละลายน้ำได้น้อย โดยการผลิตเป็นอนุภาคโคคริสตัลระหว่างตัวยา MEF กับโคฟอร์มเมอร์ 2 ชนิดได้แก่ ยาพาราเซตามอลและนิโคตินาไมด์ ด้วยกระบวน GAS และใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการละลายของยาเมเฟนามิค แอซิด ($t_{63.2}$) และค่าปริมาณยา MEF ในผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาจาก 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลายยา (% Saturation ของยา MEF) และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างตัวยา MEF กับโคฟอร์มเมอร์ ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดัง Table 2

Table2 Box-Behnken design matrix of three variables and the obtained %drug content and $t_{63.2}$ values.

Run	T	C	S	MEF content (%)	$t_{63.2}$ (min)	
					Experimental	Predicted from Eq.(2)
1	25	3	80	21.04±0.20	6.10±0.10	5.95
2	45	3	80	20.78±0.40	6.40±0.10	6.43
3	25	5	80	13.63±0.20	4.30±0.10	4.25
4	45	5	80	13.01±0.20	4.50±0.10	4.64
5	25	4	70	16.48±0.10	4.90±0.10	4.93
6	45	4	70	16.77±0.20	5.11±0.10	4.94
7	25	4	90	15.93±0.20	4.25±0.20	4.39
8	45	4	90	15.61±0.20	5.30±0.10	5.25
9	35	3	70	20.47±0.10	6.05±0.10	6.15
10	35	5	70	13.92±0.10	4.78±0.05	4.77
11	35	3	90	20.95±0.10	6.42±0.10	6.41
12	35	5	90	13.09±0.20	4.41±0.05	4.29
13	35	4	80	16.40±0.10	4.55±0.04	4.53
14	35	4	80	16.41±0.10	4.53±0.04	4.53
15	35	4	80	16.38±0.10	4.54±0.50	4.53

จาก Table 2 พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ GAS มี % MEF content อยู่ในช่วง 13-21% และมีค่า $t_{63.2}$ อยู่ในช่วง 4.25-6.42 นาที ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ GAS ทั้ง 15 การทดลองนี้ มีอัตราการละลายที่เร็วกว่ายา MEF บริสุทธิ์ ($t_{63.2}$= 68.75 นาที) เมื่อนำข้อมูลจากตารางไปหาแบบจำลองที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรม MINITAB 17 จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $t_{63.2}$ กับตัวแปรต่าง ๆ โดยพบว่าแบบจำลองแบบ Full quadratic เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังสมการที่ 2

$$t_{63.2} = 33.47 - 0.2283T - 4.555C - 0.356S + 0.00128T^2 + 0.6562C^2 + 0.002187S^2 - 0.0025T*C + 0.002125T*S - 0.0185C*S \quad (2)$$

แบบจำลองที่ได้ให้ค่า R^2 และ R^2 (adj) สูงที่สุดคือ ค่า R^2 เท่ากับ 98.64% และค่า R^2 (adj) เท่ากับ 96.18%และเมื่อทำการ optimize หาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเป็นอนุภาคโคคริสตัล พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิ 25°C อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง MEF:PAR:NIC เท่ากับ 1:4.8:4.8 และค่า % Saturation ของยา MEF ที่ 89.7% เมื่อทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวพบว่า ผลิตภัณฑ์มีค่า $t_{63.2}$ เท่ากับ 4.19 ± 0.20 นาที ซึ่งเป็นอัตราการละลายที่เร็วที่สุด และให้ค่าใกล้เคียงกับสมการที่ 2 คือ 3.99 นาที เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Wichianphong and Charoenchaitrakool (2018a) ที่ผลิตอนุภาคโคคริสตัลระหว่างตัวยา MEF กับ PAR ด้วยเทคนิค GAS พบว่าค่า $t_{63.2}$ ซึ่งเป็นอัตราการละลายที่เร็วที่สุด มีค่าเท่ากับ 11.38 นาที และ งานวิจัยของ Wichianphong and Charoenchaitrakool (2018b) ที่ผลิตอนุภาคโคคริสตัลระหว่างตัวยา MEF กับ NIC

ด้วยเทคนิค GAS เช่นเดียวกัน พบว่าค่า $t_{63.2}$ ซึ่งเป็นอัตราการละลายที่เร็วที่สุด มีค่าเท่ากับ 5.07 นาที จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีอัตราการละลายของยา MEF ที่เร็วกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ การใช้โคฟอร์มเมอร์ 2 ชนิดร่วมกัน ทำให้ปริมาณโคฟอร์มเมอร์ในการละลายเริ่มต้นมากขึ้น ช่วยให้การตกตะกอนเกิดได้เร็วขึ้น และเกิดอนุภาคโคคริสตัลมากขึ้นในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้มีอัตราการละลายที่สูงขึ้น

การวิเคราะห์อัตราการละลาย (Dissolution test)

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าโคคริสตัลที่ผลิตได้สามารถช่วยเพิ่มอัตราการละลายให้กับยา MEF ได้ จึงนำมาหาค่าการละลายที่เวลาต่างๆดังแสดงใน Figure 2 โดยเมื่อนำค่า $t_{63.2}$ ของอนุภาคโคคริสตัลจากกระบวนการ GAS ที่สภาวะที่เหมาะสม เทียบกับยา MEF บริสุทธิ์และอนุภาคโคคริสตัลจาก SE พบว่า อนุภาคโคคริสตัลจากกระบวนการ GAS มีค่า $t_{63.2}$ เท่ากับ 4.19 นาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอนุภาคโคคริสตัลจาก SE และยา MEF บริสุทธิ์เท่ากับ 1.3 และ 17.2 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การผลิตอนุภาคโคคริสตัลจากกระบวนการ GAS สามารถเพิ่มอัตราการละลายของยา MEF ได้

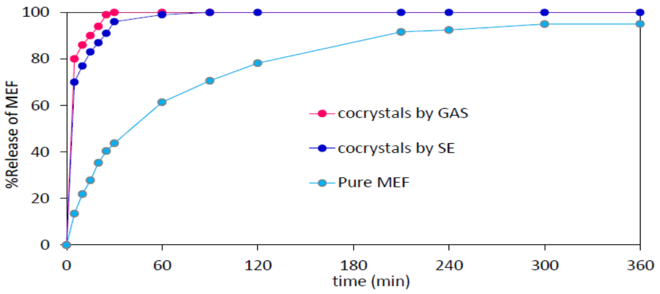


Figure 2 Dissolution profiles of the pure MEF, cocrystals by GAS and cocrystals by SE.

การวิเคราะห์อนุภาคโคคริสตัลด้วยเทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC) **และ เทคนิค** Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy

ผลิตภัณฑ์ถูกนำมาวิเคราะห์การเกิดโคคริสตัลด้วยเทคนิค DSC ดังแสดงใน Figure 3 พบว่ายา MEF ยา PAR และ NIC มีจุดหลอมเหลวที่ 229.5 °C, 168.9 °C และ 129.70 °C ตามลำดับ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ GAS และ SE มีจุดหลอมเหลวใหม่เกิดขึ้นที่ 103.1 °C และ 101.5 °C ตามลำดับ ซึ่งจุดหลอมเหลวที่ได้แตกต่างจากสารตั้งต้นทั้ง 3 ค่า และมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ GAS และ SE เป็นอนุภาคโคคริสตัล

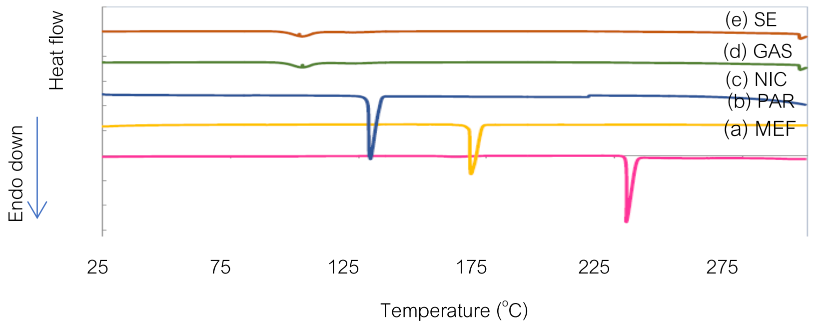


Figure 3 DSC heating curves of (a) MEF, (b) PAR, (c) NIC, (d) cocrystals by GAS and (e) cocrystals by SE.

นอกจากนี้เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ GAS และ SE ไปทำการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ของการเกิดโคคริสตัลระหว่างตัวยาและโคฟอร์มเมอร์ที่เราศึกษา โดยศึกษาจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุล (Intermolecular interaction) ของตัวยาและโคฟอร์มเมอร์ โดยหากผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นโคคริสตัล ตัวยาและโคฟอร์มเมอร์จะยึดเหนี่ยวกันเป็นโครงข่ายด้วยแรงระหว่างโมเลกุลที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ ส่วนมากมักเป็นพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเทคนิค FT-IR จะพิจารณาจากการเลื่อนตำแหน่งพีคของหมู่ฟังก์ชั่นของสารที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลของตัวยาและโคฟอร์มเมอร์ (Haeria *et al*., 2015) ผลการวิเคราะห์ด้วย FT-IR แสดงดัง Table 3 เมื่อพิจารณาตำแหน่งพีคของยา MEF พบว่า พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น (Wave number) เท่ากับ 3311 cm^{-1} (N-H stretching) หายไป และพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1576 cm^{-1} (N-H bending) เกิดการเลื่อนของเลขคลื่น จากนั้นพิจารณาที่ตำแหน่งพีคของยา PAR พบว่า พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น (Wave number) เท่ากับ 3325 cm^{-1} (N-H stretching) หายไป พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1566 cm^{-1} (N-H bending) หายไป พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1657 cm^{-1} (C=O) และ พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3109 (OH) เกิดการเลื่อนของเลขคลื่น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตำแหน่งพีคของ NIC ยังพบว่า พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3366 cm^{-1} (N-H stretching) หายไปและ พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1682 cm^{-1} (C=O) มีการเลื่อนของเลขคลื่นเกิดขึ้น จากผลการวิเคราะห์ FT-IR ดังกล่าว จึงเป็นการยืนยันได้ว่าผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ GAS และ SE เป็นอนุภาคโคคริสตัล (Gujar *et al*., 2012)

Table 3 Wave number of functional groups of MEF, NIC, PAR and cocrystals by GAS and SE.

Group	MEF	PAR	NIC	Cocrystals by SE	Cocrystals by GAS
			3366	disappeared	disappeared
N-H stretching		3325		disappeared	disappeared
	3311			disappeared	disappeared
			3161	3163	3163
N-H bending	1576			1589	1585
		1566		disappeared	disappeared
C=O			1682	1697	1693
		1657		1672	1674
	1651			1654	1654
OH		3109		3124	3119

สรุป

กระบวนการ GAS สามารถนำมาผลิตเป็นอนุภาคโคคริสตัลระหว่างยาเมเฟนามิค แอซิด ร่วมกับพาราเซตามอล และนิโคตินาไมด์ได้ จากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken พบว่า ที่อุณหภูมิ 25 ^{o}C อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง MEF:PAR:NIC เท่ากับ 1:4.8:4.8 และ % Sat MEF เท่ากับ 89.7% เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเป็นอนุภาคโคคริสตัล ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราการละลายของยา MEF ได้สูงสุด และที่สภาวะดังกล่าวมีค่า $t_{63.2}$ เท่ากับ 4.19 นาที ซึ่งต่ำกว่ายา MEF บริสุทธิ์ถึง 17.2 เท่า

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Gujar, P.P., A.A. Kokil, P.S. Karekar, Y.A. Gurav and A.V. Yadav. 2012. Improvement in physicochemical properties of nevirapine co-crystals. **International Journal of Pharmacy and Technology** 4 (4): 4831-4842.

Haeria, A. Nurzak and I. Ismail. 2015. Characterization and dissolution test of aspirin-nicotinamide cocrystal. **International Journal of PharmTech Research** 8 (10): 166-170.

Loth, H. and E. Hemgesberg. 1986. Properties and dissolution of drugs micronized by crystallization from supercritical gases. **International Journal of Pharmaceutics** 32 (2-3): 265-267.

Shewale, S., A.S. Shete, R.C. Doijad, S.S Kadam, V.A. Patil and A.V. Yadav. 2015. Formulation and solid state characterization of nicotinamide-based co-crystals of fenofibrate**. Indian Journal of Pharmaceutical Sciences** 77 (3): 328-334.

Wichianphong, N. and M. Charoenchaitrakool. 2018a. Application of box–behnken design for processing of mefenamic acid–paracetamol cocrystals using gas anti-solvent (gas) process. **Journal of CO_2 Utilization** 26: 212-220.

Wichianphong, N. and M. Charoenchaitrakool. 2018b. Statistical optimization for production of mefenamic-nicotinamide cocrystals using gas anti-solvent (gas) process. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 62: 375-382.

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตลิกนินจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

Optimization of Lignin Production from Agricultural Waste

วิภาวรรณ กิ่งแก้ว[1*] เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ[1] อนุสิษฐ์ ธนะพิมพ์เมธา[1] และ เมธี สายศรีหยุด[1]

Wipawan kingkaew[1*], Penjit Srinophakun[1] Anusith Thanapimmetha[1] and Maythee Saisriyoot[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาการผลิตลิกนินจากทะลายปาล์มเปล่า โดยทำการปรับสภาพด้วยกรดที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ได้ปริมาณของลิกนินเป็น 34.98, 35.56, 39.50, 41.89 และ 42.66 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ การทดลองนี้เลือกใช้กรดเจือจางที่ 8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการปรับสภาพด้วยกรดความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์และความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์ ได้ปริมาณลิกนินไม่ต่างกันมาก หลังจากนั้นจึงสกัดลิกนินโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำส่วนของเหลวหลังการสกัดมาตกตะกอนด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 20, 50 และ 72 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าได้ลิกนินที่ละลายในกรด (ASL) 0.65, 0.78 และ 0.87 เปอร์เซ็นต์ และลิกนินที่ไม่ละลายในกรด (AIL) 68.34, 90.15 และ 89.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 50 เปอร์เซ็นต์ ให้ตะกอนลิกนินที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด

ABSTRACT

In this study, waste of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) was pretraeted by concentration of H2SO4 as 2, 4, 6, 8 and 10% (w/w) respectively at 121 °C for 60 min. We found that, lignin contents were 34.98%, 35.56%, 39.50%, 41.89% and 42.66% respectively. The treated OPEFB by 8% acid was selected in this study due to the lignin content after pretreated at 10% and 8% acid are not much different. After that, the lignin was extracted by 2.5% (w/v) NaOH at 121 °C for 60 min with solid-liquid ratio as 10%. The liquid after extracted (black liquor) was precipitated with concentration of H2SO4 at 20, 50 and 72% (v/v). The result show that the values of acid soluble lignin (ASL) were 0.65, 0.78 and 0.87% and the values of acid insoluble lignin (AIL) were 68.34, 90.15 and 89.94% respectively. At the 50 % of H2SO4 concentration show the best pure precipitate of lignin.

Key words: Oil palm empty fruit bunch, Lignin extraction, Dilute acid pretreatment

*Corresponding author; e-mail address: **fengjrc@gmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Chemical Engineer, Faculty of Engineer, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันเนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมและความกระตือรือร้นเกี่ยวกับแนวคิดการอนุรักษ์ธรรมชาติ ทำให้เกิดการลดและใช้วัตถุดิบให้คุ้มค่า ซึ่งประเทศไทยถือว่าเป็นกลุ่มประเทศกำลังพัฒนาที่มีพื้นฐานทางด้านการเกษตรกรรม พบว่ามีวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรและจากโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตร ซึ่งมีปริมาณมากในแต่ละปี โดยวัสดุเหลือทิ้งส่วนใหญ่มักถูกกำจัดโดยการเผาเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในอุตสาหกรรม นำไปทำเป็นปุ๋ยชีวภาพ แปรรูปเป็นวัสดุเพาะชำ และใช้เป็นอาหารสัตว์ เป็นต้น ซึ่งบางครั้งมีปริมาณมากเกินความต้องการในการแปรรูป อีกทั้งยังให้มูลค่าที่ต่ำอีกด้วย

กากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตรเหล่านี้ มีสารประเภทลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบสำคัญคือ เซลลูโลส(Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนแล้วแต่สามารถนำไปเข้าสู่กระบวนการ เพื่อแปรรูปเป็นสารมูลค่าเพิ่มได้เช่น ลิกนินที่สามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ไบโอคอมโพสิท สารเคมี และสารเติมแต่ง เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำทะลายปาล์มเปล่า (Oil Palm Empty Fruit Bunch: OPEFB) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และเป็นสารประเภทลิกโนเซลลูโลสได้แก่ เปอร์เซ็นต์ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ประมาณ 39, 36 และ 22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และที่เหลืออีก 1 เปอร์เซ็นต์เป็นอื่นๆ (Aditiya, H. B. *et al.*, 2016) ซึ่งมีความเป็นไปได้และน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการสกัดลิกนิน ทะลายปาล์มเปล่าที่นำมาใช้จะต้องนำมาผ่านการเตรียมและปรับสภาพวัตถุดิบโดยเทคนิคทางเคมี ด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อลดปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส อีกทั้งเพื่อลดความเป็นโครงสร้างผลึกของลิกนิน (Sun *et al.*, 2015) หลังจากนั้นจึงนำวัตถุดิบที่เหมาะสม มาผ่านกระบวนการสกัดลิกนินโดยเทคนิคการใช้ด่าง (Alkali extraction method) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและต้นทุนต่ำ (Medina *et al.*, 2015) หลังจากการสกัดลิกนินออกมาได้โดยใช้เทคนิคดังกล่าวแล้ว จะทำการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของลิกนิน โดยศึกษาลิกนินที่ละลายในกรด (Acid Soluble Lignin; ASL) และลิกนินที่ไม่ละลายในกรด (Acid Insoluble Lignin; AIL)

อุปกรณ์และวิธีการ

กระบวนการผลิตลิกนินแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยเริ่มจากการเตรียมและปรับสภาพวัตถุดิบ การสกัดลิกนิน และการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ลิกนิน ดังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลองดังนี้

1.การเตรียมและปรับสภาพวัตถุดิบ

วัตถุดิบชีวมวลที่ใช้ คือทะลายปาล์มเปล่า ได้นำมาเตรียมโดยตากแดดให้แห้งเป็นระยะเวลาประมาณ 1 สัปดาห์ จากนั้นนำมาล้างแล้วนำไปต้มด้วยน้ำเดือด เป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อทำการกำจัดแทนนินและไขมันออก จากนั้นนำทะลายปาล์มเปล่าที่ได้ไปอบให้แห้ง เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้ นำไปปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น จนมีขนาดเป็น 0.250-0.425 มิลลิเมตร

ขั้นตอนการปรับสภาพ นำวัตถุดิบที่ผ่านการเตรียมมาปรับสภาพด้วยกรดเจือจาง โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นต่างๆได้แก่ 2 4 6 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 10 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที จากนั้นนำมากรองและล้างด้วยน้ำ แล้วแยกเอาส่วนของแข็งไปอบให้แห้ง จากนั้นทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตามวิธีของ Goering และ Van (1970) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เยื่อใย เพื่อหาวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับใช้ในขั้นตอนการสกัดลิกนิน

2.การสกัดลิกนิน

นำผงทะลายปาล์มเปล่าที่ผ่านการปรับสภาพในขั้นตอนที่ 1 มาสกัดลิกนินด้วยเทคนิคการใช้ด่าง โดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในผงทะลายปาล์มเปล่า ที่ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร ใช้อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 10 เปอร์เซ็นต์ ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที จากนั้นแยกเอาส่วนที่เป็นของเหลวไปตกตะกอนลิกนินด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 20, 50 และ 72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ได้ศึกษาการใช้กรดตกตะกอนสองกรณีคือ การตกตะกอนด้วยกรดในขั้นตอนเดียวจนมีค่าพีเอชเท่ากับ 2 ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง และการตกตะกอนสองขั้นตอน โดยเริ่มจากปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7 แล้วทิ้งไว้ประมาณ 4 ชั่วโมงก่อนปรับค่าพีเอชให้ลดลงอีกจนพีเอชเป็น 2 ทิ้งไว้ 8 ชั่วโมง เพื่อแยกตะกอนลิกนินออกในขั้นตอนนี้ ซึ่งสำหรับระหว่างการปรับพีเอชเพื่อตกตะกอนทั้งสองกรณีดังกล่าวได้ทำการกวนควบคู่ไปด้วย

ซึ่งลิกนินที่ได้จากการสกัดนั้น จะนำมาอบให้แห้งแล้ววิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของลิกนินที่ละลายในกรดและลิกนินที่ไม่ละลายในกรด ในขั้นตอนต่อไป

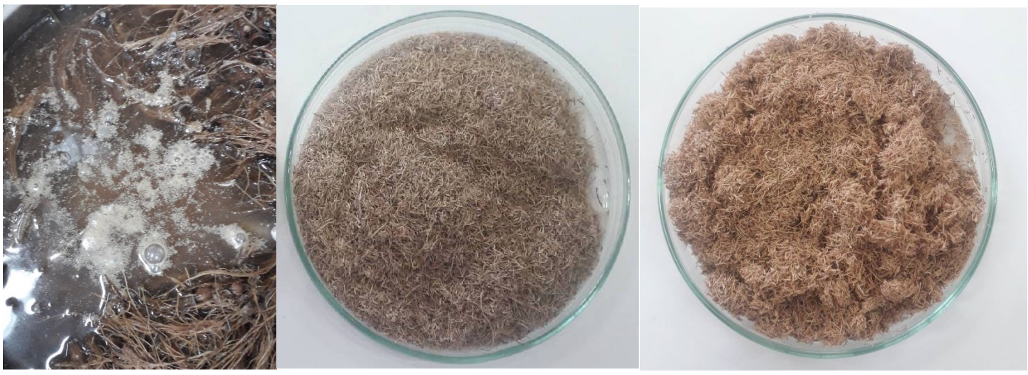
3.การวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของลิกนิน (ASL, AIL)

นำผงตะกอนลิกนินที่สกัดได้จากขั้นตอนที่ 2 มาทำการวิเคราะห์หาความบริสุทธ์ตามมาตรฐานของ NREL (2012) โดยใส่กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร บ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 60 นาที และทำการเขย่าทุกๆ 5-10 นาที หลังจากนั้นทำการเติมน้ำกลั่น ปริมาตร 84 มิลลิลิตร ตามวิธีของ Sluiter *et al.*, 2008 แล้วนำมาทำปฏิกิริยาที่หม้อนึ่งไอน้ำความดันสูง ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ต่อมาทำการแยกของแข็งและของเหลวออกจากกัน วิเคราะห์ของเหลวด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy เพื่อนำมาทำการคำนวณหาค่าลิกนินที่ละลายในกรด และนำของแข็งมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักลิกนินที่ไม่ละลายในกรด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการเตรียมและปรับสภาพวัตถุดิบ

จากการเตรียมวัตถุดิบโดยการต้มทะลายปาล์มเปล่าในน้ำร้อนพบว่าไขมันและสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับทะลายปาล์มเปล่าจากขั้นตอนต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรมได้ถูกกำจัดออก แสดงดัง Figure 1(a)



(a) (b) (c)

Figure 1 OPEFB (a), OPEFB before pretreatment (b), OPEFB after pretreatment (c).

จากนั้นทำการลดขนาดโดยการบดวัตถุดิบจนมีขนาดประมาณ 0.250-0.425 มิลลิเมตร ดังแสดงใน Figure 1(b) เมื่อทำการหาองค์ประกอบตามวิธีของ Goering และ Van (1970) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เยื่อใย พบว่าวัตถุดิบมีสัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เถ้า และอื่นๆ เท่ากับ 62.07 14.99 15.74 0.36 และ 6.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ พบว่าวัตถุดิบยังคงมีสัดส่วนขององค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่องค์ประกอบลิกนินในปริมาณที่สูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องนำวัตถุดิบดังกล่าวมาทำการปรับสภาพ เพื่อให้มีสภาพที่เหมาะสมในการสกัด โดยปรับสภาพด้วยกรดเจือจางความเข้มข้น 2 4 6 8 และ10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในหม้อนึ่งไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ดังแสดงใน Table 1 ซึ่งลักษณะของวัตถุดิบหลังปรับสภาพด้วยกรดเจือจางความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จะแสดงได้ดัง Figure 1(c)

Table 1 Composition of OPEFB before pretreatment and after pretreatment.

Dilute acid concentration (%)	Component (%)				
	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Ash	Other
0*	62.07±0.05	14.99±0.01	15.74±0.02	0.36±0.01	6.83±0.06
2	56.13±0.17	3.25±0.19	34.98±0.11	0.70±0.09	4.94±0.04
4	54.47±0.13	2.40±0.08	35.56±0.18	0.72±0.01	6.86±0.13
6	50.52±0.35	0.99±0.32	39.50±0.33	0.70±0.27	8.29±0.28
8	48.45±0.23	0.87±0.34	41.89±0.27	0.66±0.33	8.12±0.26
10	47.73±0.32	0.32±0.36	42.66±0.41	0.61±0.24	8.67±0.19

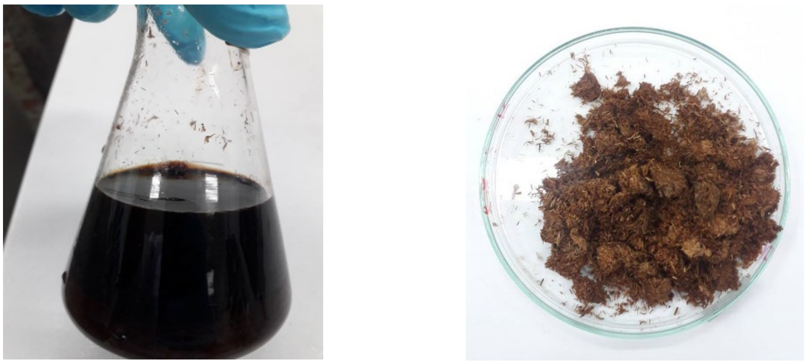
* Composition before pretreatment

จาก Table 1 พบว่าเมื่อใช้กรดที่ความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น จะมีปริมาณของเซลูโลส เฮมิเซลลูโลส เถ้า และอื่นๆ ที่ลดลง แต่มีแนวโน้มของลิกนินเพิ่มสูงขึ้นแล้วเริ่มมีปริมาณคงที่หลังการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางความเข้มข้นมากกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกการปรับสภาพที่เหมาะสมเป็นกรดซัลฟิวริกเจือจางความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์

ผลของการสกัดลิกนิน

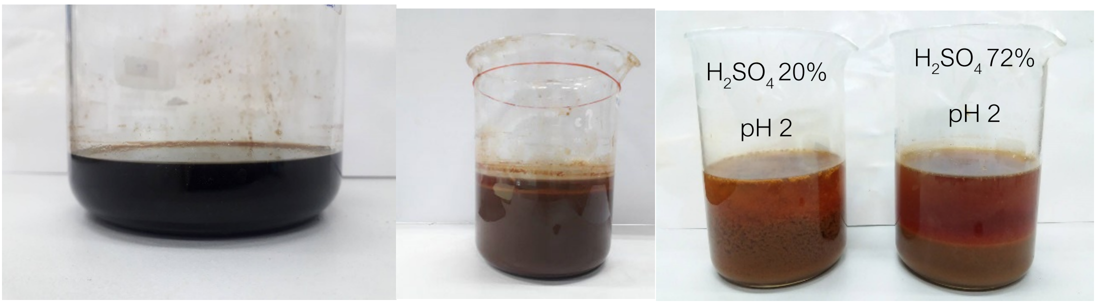
การสกัดลิกนินจากผงทะลายปาล์มเปล่าที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดเจือจาง 8 เปอร์เซ็นต์ แสดงดัง Figure 2(a) โดยเทคนิคการใช้ด่าง (Alkaline extraction method) ชนิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร ในอัตราส่วนผงทะลายปาล์มเปล่าที่ผ่านการปรับสภาพต่อปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยาในหม้อนึ่งไอน้ำ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที แล้วหลังจากการสกัดลิกนินจะมีทะลายปาล์มเปล่าที่เหลืออยู่ (Delignin oil palm empty fruit bunch) ดังแสดงใน Figure 2(b) และในส่วนของเหลวที่แยกออกมาจะมีลักษณะเป็นน้ำสีดำ แสดงดัง Figure 3(a) ซึ่งเมื่อตกตะกอนด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกันเป็น 20 50 และ 72 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อค่าพีเอชลดลงจนเริ่มเข้าสู่ค่าพีเอชประมาณ 5 ของเหลวที่ผ่านการสกัดจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ดังแสดงใน Figure 3(b) และพบว่ามีการตกตะกอนลิกนินที่ความเข้มข้นกรดสูงๆ จะมีความเร็วในการเกิดตะกอนมากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำๆ แสดงดัง Figure 3(c) เนื่องจากกรดที่มีความเข้มข้นสูงจะมีไอออนที่เข้าไปจับตะกอนแล้วเร่งอัตราการตกตะกอนได้เร็วกว่า (ธานินทร์, 2560)

หลังจากนั้นผงลิกนินที่ได้หลังจากการสกัด จะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล ดังแสดงใน Figure 4(a) โดยสังเกตได้ว่า เมื่อนำลิกนินที่สกัดได้ไปเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพกับลิกนินทางการค้า พบว่าลิกนินที่สกัดได้จะมีสีน้ำตาลที่อ่อนกว่าลิกนินทางการค้า แสดงดัง Figure 4(b)



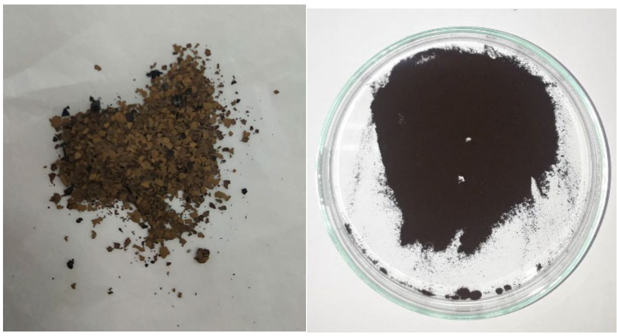
(a) (b)

Figure 2 Solution after extraction (a) Delignin OPEFB (b).



(a) (b) (c)

Figure 3 Liquid from lignin extraction (a) Solution was adjusted of pH 5 (b) Solution was adjusted of pH 2 by different acid concentration (c).



(a) (b)

Figure 4 Lignin in this research (a) Commercial lignin (b).

ผลของการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของลิกนิน (ASL, AIL)

หลังจากการสกัดลิกนินด้วยด่าง ได้แยกของเหลวมาตกตะกอนลิกนินด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็น 20 50 และ 72 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แล้วนำตัวอย่างที่ได้มาทำการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของลิกนินด้วยวิธี NREL (2006) พบว่าได้ผลการศึกษา ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Component ASL and AIL with different tyes of precipitation.

Sulfuric acid concentration (%)	Type of precipitation	AIL (%)	ASL (%)
20	one step*	58.12±1.42	0.54±0.29
	two steps**	68.34±1.36	0.65±0.35
50	one step*	88.56±1.16	0.72±0.34
	two steps**	90.15±1.32	0.78±0.42
72	one step*	86.12±1.01	0.83±0.51
	two steps**	89.94±1.43	0.87±0.72

one step* = Adjust to pH 2 , two steps** = Adjust to pH 7 and adjust to pH 2 respective

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า หลังการสกัดแล้วตกตะกอนลิกนินด้วยกรดที่ความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดตะกอนที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การตกตะกอนด้วยกรดแบบสองขั้นตอน จะให้ลิกนินที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าการตกตะกอนลิกนินด้วยกรดแบบขั้นตอนเดียว เนื่องจากที่ค่าพีเอชประมาณ 7 มีการกำจัดสารที่เกิดจากการย่อยสลายโพลีแซคคาไรด์และสิ่งเจือปนจำพวกซิลิกาออก พร้อมลดความปนเปื้อนของตะกอนลิกนิน (วิชชา, 2545) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Minu, K. *et al.* (2012) ที่พบว่าการใช้กรดสองขั้นตอนจะทำให้ตะกอนลิกนินที่ได้มีปริมาณซิลิกาน้อยกว่าการใช้กรดขั้นตอนเดียว และเมื่อเปรียบเทียบกับลิกนินทางการค้าพบว่า มีลิกนินที่ละลายในกรด 0.40±0.21 เปอร์เซ็นต์ และลิกนินที่ไม่ละลายในกรด 49.74±0.54 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าลิกนินที่สกัดได้ในงานวิจัยนี้สำหรับทุกสภาวะการทดลอง มีความบริสุทธิ์สูงกว่าลิกนินทางการค้าทั้งสิ้น

สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำทะลายปาล์มเปล่าซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร มาทำการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางเพื่อให้วัตถุดิบมีสภาพที่เหมาะสมต่อการสกัดลิกนิน จากนั้นจึงนำวัตถุดิบที่เหมาะสมมาสกัดลิกนินโดยวิธีการใช้ด่างหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการตกตะกอนลิกนินโดยการลดค่าพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน จากนั้นจึงนำลิกนินที่สกัดได้มาทำการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของลิกนินที่ละลายในกรด(ASL) และลิกนินที่ไม่ละลายในกรด (AIL)

ผลการปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าด้วยกรดเจือจาง พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดเจือจางเพิ่มขึ้น จะได้วัตถุดิบที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบลิกนินเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้นกรดเจือจางเท่ากับ 8 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ซึ่งให้สัดส่วนของลิกนินเท่ากับ 41.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ดังนั้นความเข้มข้นของกรดเจือจางดังกล่าวจึงถูกเลือกเพื่อใช้ปรับสภาพวัตถุดิบก่อนนำไปสกัดลิกนิน

ผลการสกัดลิกนินจากทะลายปาล์มเปล่า พบว่าผงลิกนินมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล และลิกนินที่สกัดได้นั้นมีความบริสุทธิ์สูงเมื่อตกตะกอนด้วยกรดแบบสองขั้นตอน โดยที่ความเข้มข้นกรด 20 50 และ 72 เปอร์เซ็นต์มีปริมาณลิกนินที่ไม่ละลายในกรด 68.34 90.15 และ 89.94 เปอร์เซ็นต์ และลิกนินที่ละลายในกรด 0.65 0.78 และ 0.87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท สุขสมบูรณ์จำกัด ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบชีวมวลที่ใช้ คือ ทะลายปาล์มเปล่า และขอขอบคุณ ผู้ดูแลห้องทดลอง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และช่วยควบคุมดูแลในการใช้เครื่องมือต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

วิชชา พิชัยณรงค์. 2545. **การแยกลิกนินออกจากน้ำดำในกระบวนการทำเยื่อกระดาษจากยูคาลิปตัส**. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธานินทร์ แตงกวารัมย์. 2560. **เคมีวิเคราะห์** (Online). http://www.appliedchem.mju.ac.th, 18 พฤศจิกายน 2562.

Aditiya, H.B., W.T. Chong, T.M.I. Mahlia, A.H. Sebayang, M.A. Berawi and H. Nur. 2016. Second generation bioethanol potential from selected malaysia's biodiversity biomasses: A review. Waste Management. 47: 46-61.

Medina, J.D., A. Woiciechowski, A. Zandona Filho, M.D. Noseda, B.S. Kaur and C.R. Soccol. 2015. Lignin preparation from oil palm empty fruit bunches by sequential acid/alkaline treatment – a biorefinery approach. Bioresource Technology. 194: 172-178.

Minu, K., K.K. Jiby and V.V.N. Kishore. 2012. Isolation and purification of lignin and silica from the black liquor generated during the production of bioethanol from rice straw. Biomass and Bioenergy. 39: 210-217.

Sun, S.-N., H.-Y. Li, X.-F. Cao, F. Xu and R.-C. Sun. 2015. Structural variation of eucalyptus lignin in a combination of hydrothermal and alkali treatments. **Bioresource Technology**. 176: 296-299.

Tye, Y.Y., K.T. Lee, W.N. Wan Abdullah and C.P. Leh. 2016. The world availability of non-wood lignocellulosic biomass for the production of cellulosic ethanol and potential pretreatments for the enhancement of enzymatic saccharification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 60:155-172.

ผลของอนุภาคผงยางและสารเชื่อมขวางเปอร์ออกไซด์ ที่มีต่อความสามารถในการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง

Effects of ultrafine powdered rubber and peroxide crosslinking agent on flow-ability and mechanical properties of recycled high density polyethylene

นัฐนรี โสภาเจริญวงศ์[1] รัฐโรจน์ อัครธนกุลกิตติ์[2] ธีระศักดิ์ หมากผิน[1] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ[1] และเอกชัย วิมลมาลา[1]

Natnaree Sopacharoenwong[*1] Rattaroj Akkarathanakulkit[2] Teerasak Markpin[1] Narongrit Sombatsompop[1] and Ekachai Wimolmala[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมอนุภาคผงยาง (Ultrafine powdered rubber: UPR) และสารเชื่อมขวางไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพลาสติกของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง (Recycled high density polyethylene: rHDPE) โดยผสมผงยางอะคริเลต (Acrylate powdered rubber: ACM-UPR) และผงยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene powdered rubber: SBR-UPR) ปริมาณ 0-12 pph ส่งผลทำให้ความสามารถในการไหลมีแนวโน้มลดลง ความหนาแน่นโดยรวมมีค่าอยู่ในช่วง 0.956-0.998 g/cm^3 การผสมผงยางทำให้อุณหภูมิการโก่งตัวของพลาสติกลดลง ในขณะที่การเติม DCP พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงลดลง การเติม ACM-UPR ปริมาณ 2-6 pph และ SBR-UPR ปริมาณ 2 pph มีค่าการยืดตัวและความเหนียวเพิ่มขึ้น สำหรับการเติม DCP พบว่า rHDPE มีการไหลตัวได้ยากขึ้น การเติม DCP ปริมาณ 0.1-0.3 pph ทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่การยืดและความเหนียวลดลง โดยสรุป ส่วนผลการเติม ACM-UPR และ SBR-UPR ปริมาณ 2 pph ร่วมกับ DCP ปริมาณ 0.1 pph ทำให้วัสดุ rHDPE มีค่ามอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่การยืดตัวและความเหนียวมีค่าลดลง

Abstract

This work aimed to investigate the effects of ultrafine powdered rubber (UPR) and dicumyl peroxide (DCP) on physical and mechanical properties of recycled high-density polyethylene (rHDPE). The results showed that the addition of acrylate powdered rubber (ACM-UPR) and styrene butadiene powdered rubber (SBR-UPR) content at 0-12 pph decreased the flow-ability of the polymer, the overall density was 0.956-0.998 g/cm^3 and the addition of powdered rubber decreased the heat distortion temperature, but the opposite effect was found with DCP addition. The tensile modulus and tensile strength of rHDPE also decreased with increases in elongation at break and toughness at 2-6 pph of ACM-UPR and 2 pph of SBR-UPR. The addition of peroxide crosslinking agent decreased the flow-ability. The addition of 0.1-0.3 pph DCP resulted in increased modulus and tensile strength with reduced elongation at break and tensile toughness. In summary, the additions of ACM-UPR and SBR-UPR content at 2 pph with DCP at 0.1 pph led to the increases in tensile modulus and tensile strength with reduced elongation at break and toughness.

Key Words: Powdered rubber, Plastic recycled, Mechanical properties, Peroxide agent

* Corresponding author; e-mail address: natnaree.m2m@mail.kmutt.ac.th

[1]กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[1]Polymer Processing and Flow (P-PROF) Research Group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

[2]บริษัท เอส.พี. พลาสติก อินดัสตรี จำกัด กรุงเทพมหานคร 10140

[2]S.P. Plastic Industries Co., Ltd, Bangkok 10140

คำนำ

ปัจจุบันพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) มีการนำใช้งานหลากหลาย โดยนำมาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ประเภท ถังน้ำ ถังพลาสติก ตะกร้า ถาดใส่ของ เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงสูง สามารถต้านทานต่อสารเคมี และตัวทำละลายต่างๆ ได้ดี โดยนิยมนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการรีไซเคิล (Recycled high density polyethylene: rHDPE) ทำการขึ้นรูปใหม่เป็นบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวเพื่อทดแทนการใช้เม็ดพลาสติกเกรดบริสุทธิ์ (Virgin grade) เนื่องจาก HDPE เป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถนำกลับมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ เรียกว่า การรีไซเคิล (Recycle) แต่อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล เมื่อได้รับความร้อนในกระบวนการการหลอมขึ้นรูป (Oblak *et al.* (2015)) ทำให้มีสมบัติเชิงกลด้านการรับแรงโดยรวมลดลง มีความเปราะมากยิ่งขึ้น ดังนั้น การปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง และความต้านทานต่อการรับแรงกระแทก (ความเหนียว) ของพลาสติกรีไซเคิลจึงเป็นสมบัติหลักของวัสดุที่สนใจ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ศึกษาการนำผงอนุภาคยางขนาดนาโนเมตร (Ultrafine powdered rubber: UPR) เป็นสารเพิ่มความเหนียวสำหรับพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน พบว่าการเติมผงยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene powdered rubber: SBR-UPR) ทำให้พอลิโพรพิลีนมีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเพียงเล็กน้อย (Zhang *et al.* (2002)) นอกจากนี้ มีการศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของ HDPE โดยทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) ภายในโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยสารเชื่อมขวางเปอร์ออกไซด์ (Peroxide crosslinking) พบว่า พลาสติกชนิด HDPE มีสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น (Tamboli et al. (2004))

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีความสนใจศึกษาผลของชนิดและปริมาณของอนุภาคผงยางเกรดทางการค้า 2 ชนิด คือ ผงยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR-UPR) และผงยางอะคริเลต (ACM-UPR) และการเติมสารเชื่อมขวางเปอร์ออกไซด์ชนิด Dicumyl peroxide (DCP) และการผสมอนุภาคผงยางเกรดการค้าร่วมกับสารเชื่อมขวางเปอร์ออกไซด์ ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและสารเคมีวิจัย

วัสดุหลักในการวิจัยใช้เม็ดพลาสติก rHDPE จากบริษัท เอส.พี. พลาสติก อินดัสตรี จำกัด มีความสามารถในการไหล (Flow-ability) มีค่า 6.78 g/10 min ความหนาแน่น (Density) 0.960 g/cm^3 สำหรับผงยางเกรดการค้า ได้แก่ ผงยางเกรดอะคริเลต (ACM-UPR) และผงยางเกรดสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR-UPR) ได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัท สยามเอ็กเท็กซ์ จำกัด มีลักษณะเป็นผงสีขาว/ทึบแสง โดยที่ผงยางอะคริเลตมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 70 นาโนเมตร และผงยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 100 นาโนเมตร สำหรับสารเชื่อมขวาง DCP จาก หจก. กิจไพบูลย์เคมี

การเตรียมตัวอย่าง

นำเม็ด rHDPE อบขจัดความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 70°C เวลา 8 ชั่วโมง โดยเตรียมทำการผสม rHDPE กับ ACM-UPR และSBR-UPR ที่ปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8 ,10 และ 12 ส่วนต่อร้อยส่วนของพลาสติก (Part per hundred of plastic: pph) และผสมพลาสติก rHDPE กับสารเชื่อมขวาง DCP ที่ปริมาณต่างๆ ดังนี้ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 pph ด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High speed mixer) รุ่น LMXS บริษัท LAB TECH Engineering จำกัด เวลาในการผสม 2 นาที จากนั้นทำการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) รุ่น CTW 1000 C บริษัท Haake Rheomax จำกัด ประเทศเยอรมนี อุณหภูมิการผสมจากบริเวณ Feed zone ถึง Die zone ที่ 165, 170, 175 และ 180°C ตามลำดับ ความเร็วรอบการผสมที่ 40 รอบต่อนาที ทำการตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก ต่อจากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่ได้ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) รุ่น E-80B ของบริษัท Elite Precision Machinery จำกัด สาธารณรัฐประชาชนจีน (ฮ่องกง) อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปจากบริเวณ Feed zone ถึง Metering zone อยู่ที่ 190, 210, 220 และ 220 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

การตรวจสอบสมบัติกายภาพ เชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ทำการตรวจสอบความสามารถในการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer รุ่น WJ-400B บริษัท Chengde shiyanji จำกัด สาธารณรัฐประชาชนจีน ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D1238-13 อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 5.325 กิโลกรัม เวลาการทดสอบ 10 นาที ตรวจสอบความหนาแน่น (Density) ตามมาตรฐาน ASTM D792-13 ตรวจสอบสมบัติเชิงกล ความต้านทานแรงดึง และค่าความเหนียวจากการดึง (Tensile toughness) ด้วยเครื่อง Universal testing machine รุ่น Autograph AG-I บริษัท Shimadzu จำกัด ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตร/นาที ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D638-14 ตรวจสอบอุณหภูมิการโก่งตัวของพลาสติก ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D648-18 ด้วยเครื่อง HDT / Vicat Tester HV3 บริษัท INSTRON ประเทศสหรัฐอเมริกา อุณหภูมิทดสอบในช่วงระหว่าง 35 – 150°C และตรวจสอบการกระจายตัวของผงยางและลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) บริษัท FEI ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น Nova NanoSEM 450 ความต่างศักย์ 5 kV โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบหักในไนโตรเจนเหลวแล้วเคลือบทองก่อนการตรวจสอบ SEM

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลสมบัติทางกายภาพของ rHDPE ที่ผสมผงยางและสารเชื่อมขวาง DCP

Table 1 แสดงความสามารถในการไหลของพลาสติก rHDPE ที่ผสมผงยางและสารเชื่อมขวาง DCP ผลการทดลองพบว่าการเติม ACM-UPR และSBR-UPR ที่ปริมาณตั้งแต่ 0-12 pph ในพลาสติก rHDPE ทำให้ความสามารถในการไหลของพลาสติก rHDPE มีค่าลดลง (ไหลได้ยาก) ตามปริมาณของผงยางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมผงยางทำให้ค่าความหนืดของพลาสติก rHDPE มีค่าเพิ่ม โดยที่การเติมผงยางชนิด SBR-UPR มีการไหลได้ยากกว่า (มีค่าน้อยกว่า) ผงยางชนิด ACM-UPR เนื่องจาก SBR-UPR มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่า ACM-UPR ส่วนกรณีการเติมสารเชื่อมขวาง DCP ผสมใน rHDPE ร่วมกับ ที่ปริมาณต่างๆ พบว่าการไหลตัวของพลาสติก rHDPE มีค่าลดลงอย่างมาก (ไม่ไหลตัว) เนื่องจาก พลาสติก rHDPE เกิดการเชื่อมขวางเป็นโครงสร้างตาข่ายที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงสูง (Sanchez et al. (2016)) ส่วนในกรณีของพลาสติก rHDPE

ผสมกับผงยาง ACM-UPR / SBR-UPR และร่วมกับ DCP พบว่าความสามารถในการไหลของพลาสติก rHDPE มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ส่วนค่าความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติก rHDPE พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.956-0.998 g/cm^3 นอกจากนี้การเติมผงยางส่งผลทำให้อุณหภูมิการโก่งตัวของพลาสติกมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ rHDPE ที่ไม่เติมผงยาง ทั้งนี้เนื่องจากผงยางมีค่าความแข็งโดยรวมที่ต่ำกว่า rHDPE ส่วนการผสม DCP ร่วมด้วย ทำให้อุณหภูมิการโก่งตัวของพลาสติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางในโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น

Table 1 Flow-ability and density of rHDPE mixed with powdered rubber and peroxide crosslinking agent.

Sample	Flow-ability (g/10min)	Density (g/cm^3)	HDT (^{o}C)	Sample	Flow-ability (g/10min)	Density (g/cm^3)	HDT (^{o}C)
rHDPE	6.78	0.960	67.2 ±2.0	SBR 8 pph	3.27	0.982	N/A
ACM 2 pph	6.72	0.961	61.5 ±0.9	SBR 10 pph	3.13	0.992	64.6 ±1.3
ACM 4 pph	5.93	0.965	N/A	SBR 12 pph	3.02	0.998	N/A
ACM 6 pph	5.15	0.967	62.5 ±1.2	DCP 0.1 pph	0.41	0.959	67.8 ±3.2
ACM 8 pph	5.03	0.968	N/A	DCP 0.2 pph	0.17	0.960	N/A
ACM 10 pph	4.92	0.972	61.1 ±3.0	DCP 0.3 pph	0.06	0.960	71.8 ±1.7
ACM 12 pph	4.77	0.974	N/A	DCP 0.4 pph	0.04	0.966	N/A
SBR 2 pph	4.90	0.968	62.1 ±3.4	DCP 0.5 pph	0.00	0.956	68.5 ±1.9
SBR 4 pph	4.23	0.973	N/A	ACM2/D0.1**	0.75	0.958	65.1 ±1.7
SBR 6 pph	3.52	0.976	63.4 ±1.7	SBR2/D0.1***	0.55	0.967	71.1 ±1.1

*N/A = Not available, **ACM2/D0.1= ACM 2 pph + DCP 0.1 pph, ***SBR2/D0.1= SBR 2 pph + DCP 0.1 pph

ผลทดสอบสมบัติเชิงกลของพลาสติก rHDPE ที่เติมผงยาง ACR-UPR และ SBR-UPR

ผลสมบัติเชิงกลของพลาสติก rHDPE ที่ผสม ACR-UPR และ SBR-UPR ที่ปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 pph แสดงใน Figure 1 พบว่าการเติมผงยางทั้งสองเกรดในพลาสติก rHDPE ส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสของ rHDPE มีค่าลดลง เนื่องจากการเติมวัสดุประเภทยางที่มีค่ามอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) โดยรวมต่ำกว่าพลาสติก rHDPE แสดงใน Figure 1(a) สำหรับค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) แสดงใน Figure 1(b) พบว่าการเติม ACM-UPR และ SBR-UPR ส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึงของ rHDPE มีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพลาสติก rHDPE ที่ผสมผงยางแสดงใน Figure 1(c) พบว่าการเติม ACM-UPR ที่ปริมาณ 2-6 pph ส่งผลทำให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น และพบอีกว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางเติมในพลาสติก rHDPE ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากผงยางเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) ทำให้ความสามารถในการยืดตัวของ rHDPE ลดลง โดยที่การยืดตัว ณ จุดขาดของ rHDPE ที่ผสม ACM-UPR มีค่ามากกว่าการผสม SBR-UPR ในพลาสติก rHDPE เนื่องจาก ACM-UPR มีการกระจายตัวใน rHDPE ได้ดีกว่า SBR-UPR ค่าความเหนียว (Tensile toughness) แสดงใน Figure 1(d) พบว่าการเติม ACM-UPR ปริมาณ 2-6 pph และการเติม SBR-UPR ปริมาณ 2 pph พบว่าความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผงยางสามารถกระจายตัวได้ใน rHDPE แต่เมื่อปริมาณของผงยางเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเกาะกลุ่มด้วยกันเอง ส่งผลทำให้ความเหนียวของพลาสติก rHDPE ลดลง

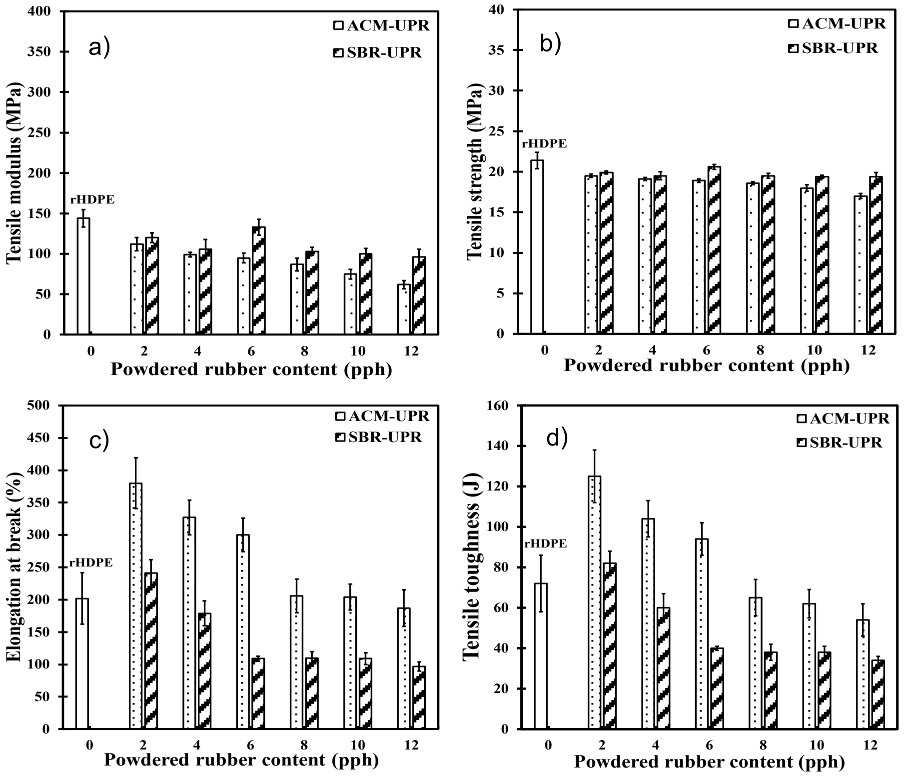


Figure 1 Mechanical properties of rHDPE mixed with powdered rubber (a) Tensile modulus (b) Tensile strength (c) Elongation at break and (d) Tensile toughness.

จากผลการทดลองสมบัติเชิงกลสามารถอธิบายด้านการกระจายตัวและการเกาะกลุ่มของผงยางในพลาสติก rHDPE ด้วยเทคนิค SEM แสดงใน Figure 2 โดยที่ Figure 2(a) และ Figure 2(b) ผสม ACM-UPR ปริมาณ 2 และ 12 pph ตามลำดับ และ Figure 2(c) และ Figure 2(d) ผสม SBR-UPR ปริมาณ 2 และ 12 pph ตามลำดับ

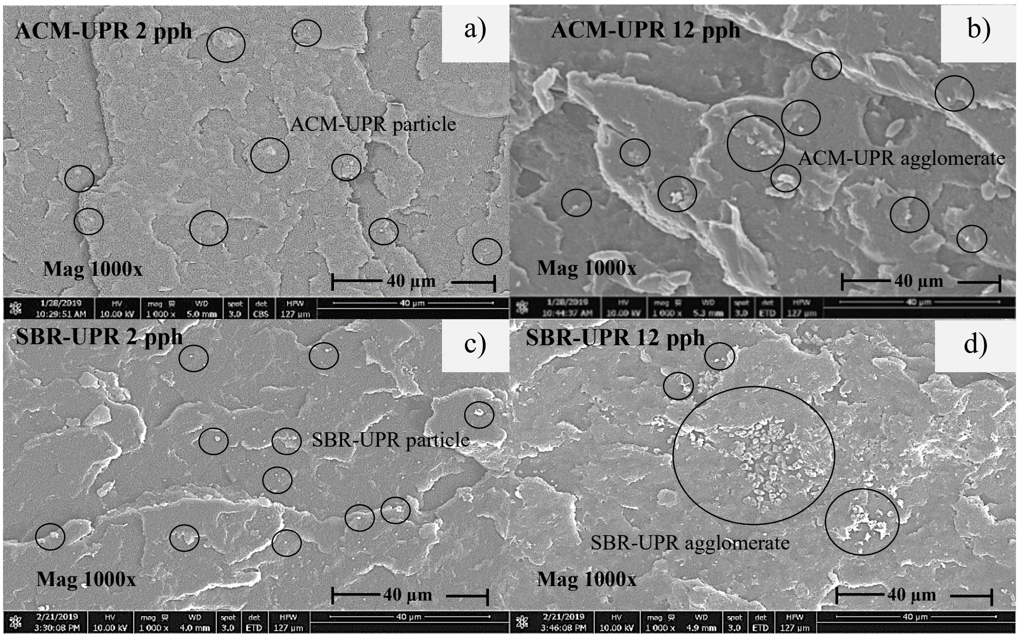


Figure 2 SEM morphology by SEM of rHDPE mixed with powdered rubber (a) ACM-UPR 2 pph (b) ACM-UPR 12 pph (c) SBR-UPR 2 pph and (d) SBR-UPR 12 pph.

ผลทดสอบสมบัติเชิงกลของพลาสติก rHDPE ที่เติมสารเชื่อมขวาง DCP

Figure 3 แสดงสมบัติเชิงกลด้านมอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงของ rHDPE ที่เติมสารเชื่อมขวาง DCP ที่ปริมาณ 0.1-0.3 pph แสดงใน Figure 3(a) และ Figure 3(b) ตามลำดับ พบว่าการเติม DCP ส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงของ rHDPE เพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลเกิดการเชื่อมขวางเป็นโครงสร้างร่างแหที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Sanchez et al. (2016)) และเมื่อปริมาณของ DCP เพิ่มขึ้นเป็น 0.4-0.5 pph พบว่าค่ามอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณของ DCP ที่มากเกินไปทำให้เกิดปฏิกิริยาการตัดขาดสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) ส่งผลทำให้น้ำหนักของสายโซ่โมเลกุลของ rHDPE ลดลง ทำให้ความแข็งแรงมีค่าลดลง (แสดงใน Table 1) และค่าการยืดตัวและค่าความเหนียว แสดงใน Figure 3(c) และ Figure 3(d) ตามลำดับ พบว่าการเติม DCP ส่งผลทำให้การยืดตัวและความเหนียวของ rHDPE ลดลง เนื่องจากการเกิดเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุล ทำให้สายโซ่ rHDPE เกิดการยึดตรึง (Restriction) และมีความแข็งแกร่งเพิ่มขึ้น (Cassidy et al. (2016)) และทำให้ชิ้นงานทดสอบมีความเปราะ (Brittleness) (Fayolle et al. (2007))

ผลทดสอบสมบัติเชิงกลของ rHDPE ที่ผสมผงยางร่วมกับสารเชื่อมขวาง DCP

Table 2 แสดงสมบัติเชิงกลของ rHDPE ที่ผสมผงยาง ACM-UPR และผงยาง SBR-UPR ปริมาณ 2 pph ร่วมกับสารเชื่อมขวาง DCP ที่ 0.1 pph พบว่าค่ามอดุลัสแรงดึง และความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ rHDPE ที่เติมผงยาง และเมื่อเติมสารเชื่อมขวาง DCP ร่วมกับผงยาง ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink) ทำให้สายโซ่โมเลกุลของ rHDPE มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และค่าความเหนียวมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมขวางที่มากทำให้สายโซ่โมเลกุล rHDPE เกิดการยึดตรึง (Restriction) ส่งผลทำให้พลาสติกมีสมบัติด้านความยืดหยุ่นลดลง

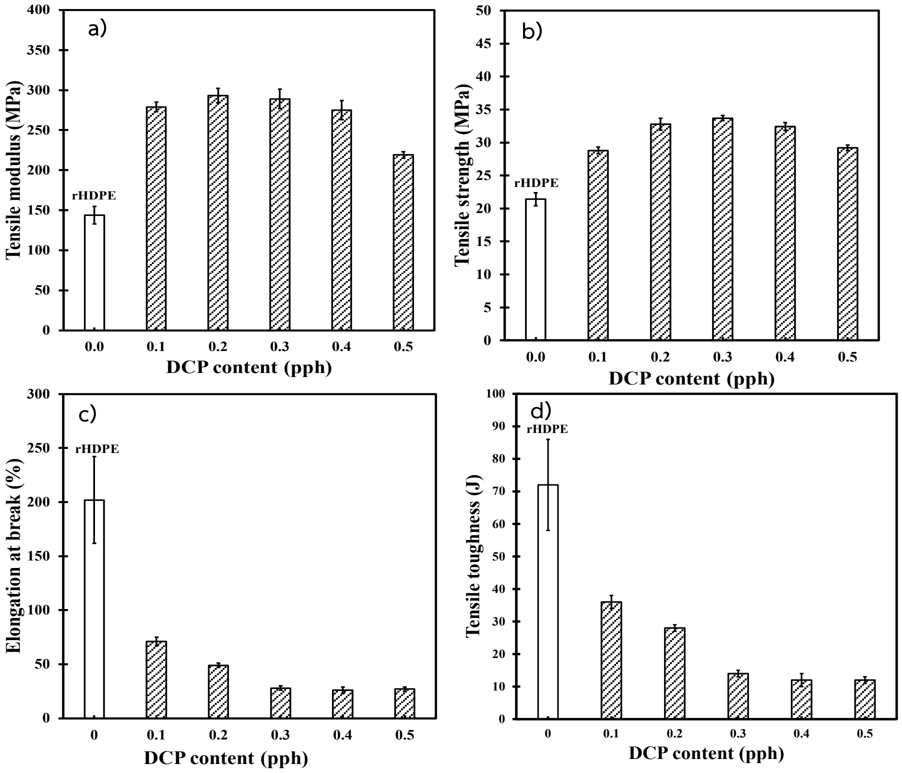


Figure 3 Mechanical properties of rHDPE mixed with DCP (a) Tensile modulus (b) Tensile strength (c) Elongation at break และ (d) Tensile toughness

Table 2 Mechanical properties of rHDPE mixed with powdered rubber and DCP

Sample	Mechanical properties			
	Tensile modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile toughness (J)
rHDPE	144 ±11	21.4 ±1.0	202 ±40	72 ±14
rHDPE/ACM 2 pph	112 ±8	19.5 ±0.2	380 ±39	125 ±13
rHDPE/SBR 2 pph	120 ±6	19.9 ±0.2	241 ±21	82 ±6
rHDPE/DCP 0.1 pph	331 ±7	32.0 ±0.5	52 ±4	36 ±2
rHDPE/ACM 2 pph/DCP 0.1 pph	191 ±6	24.5 ±0.5	76 ±2	34 ±1
rHDPE/SBR 2 pph/DCP 0.1 pph	316 ±6	32.9 ±0.3	39 ±5	22 ±3

สรุปผลการทดลอง

1. การเติมผงยางอะคริเลต ผงยางสไตรีนบิวทาไดอีน และ DCP ทำให้ความสามารถในการไหลของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูงไหลได้ยาก ความหนาแน่นโดยรวมมีค่าในช่วง 0.956-0.998 g/cm^3 อุณหภูมิการโก่งตัวของพลาสติกลดลง ในขณะที่การเติมสารเชื่อมขวาง DCP ทำให้อุณหภูมิการโก่งตัวของพลาสติกเพิ่มขึ้น

2. การเติมผงยางเกรดสไตรีนบิวทาไดอีน และผงยางเกรดอะคริเลตในพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง ทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึงและความเหนียวมีค่าลดลง การเติมผงยางอะคริเลต ปริมาณ 2-6 pph และการเติมผงยางสไตรีนบิวทาไดอีน ปริมาณ 2 pph มีค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้น

3. การเติม DCP ปริมาณ 0.1-0.3 pph ทำให้มอดุลัสแรงดึง และความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ค่าการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง และเมื่อเติมปริมาณ DCP เพิ่มขึ้น พบว่าค่ามอดุลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงลดลง

4. การเติมผงยางอะคริเลตและผงยางสไตรีนบิวทาไดอีนปริมาณ 2 pph ร่วมกับ DCP ที่ปริมาณ 0.1 pph ทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึง และความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการยืดตัวและความเหนียวมีค่าลดลง

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบพระคุณทุนโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ร่วมกับบริษัท เอส พี พลาสติก อินดัสตรี จำกัด เลขที่สัญญา MSD61I0066 และโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) บริษัท สยามเอ็กเท็กซ์ จำกัด ให้สารเคมีวิจัย และบริษัท อินโนเวชั่น กรุ๊ป จำกัด ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

Cassidy, J., Nesaei, S., McTaggart, R., and Delfanian, F. 2016. Mechanical Response of High Density Polyethylene to Gamma Radiation from Cobalt-60 Irradiator. **Polymer Testing**. 52: 111-116.

Fayolle, B., Colin, X., Audouin, L., and Verdu, J. 2007. Mechanism of Degradation Induced Embrittlement in Polyethylene. **Polymer Degradation and Stability**. 92: 231-238.

Oblak, P., Gutierrez, J.G., Zupancic, B., Aulova, A. and Emri, I. 2015. Processability and Mechanical Properties of Extensively Recycled High Density Polyethylene. **Polymer Degradation and Stability.** 114: 133-145.

Sanchez, C.G., Aguirre, A.M., Garcia, B.P., Acosta, J., Valero, C.F., Ordan, M.U., Sanchez, C., and Urreaga, J.M. 2016. Enhancement of Mechanical Properties of Waste-Sourced Biocomposites through Peroxide induced Crosslinkings. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. 80: 285-291.

Tamboli, S.M., Mhaske, S.T., and Kale, D.D. 2004. Crosslinked Polyethylene. **Indian Journal of Chemical**. 11: 853-864.

Zhang, M., Liu, Y., Zhang, X., Gao, J., Huang, F., Song, Z., Wei, G. and Qiao, J. 2002.The Effect of Elastomeric Nano-Particles on the Mechanical Properties and Crystallization Behavior of Polypropylene. **Polymer**. 43: 5133-5138.

การเคลื่อนที่ของควันซึ่งเป็นผลกระทบจากระดับและตำแหน่งที่เกิดไฟไหม้ และเวลาการอพยพคนในอุโมงค์ทางลอดรถยนต์ ประเทศไทย

Effects of Fire Elevate and Location on Smoke Movement and Time of People Evacuation in Road Tunnel of Thailand

<u>ปัญญวัฒน์ แก้วกุดั่น</u>[1] ณัฐศักดิ์ บุญมี[2*]

<u>Panyawat Kaewkudan</u>[1], Nathasak Boonmee[2*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของควันซึ่งเป็นผลกระทบจากระดับและตำแหน่งที่เกิดไฟไหม้และเวลาการอพยพคนในอุโมงค์ทางลอด ประเทศไทย ด้วยแบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณFire Dynamics Simulator(FDS) โดเมนการคำนวณ กว้าง 8.5 เมตร สูง 5.4 เมตร ยาว 447 เมตร เกิดอุบัติเหตุไฟไหม้ที่กลางอุโมงค์กับ passenger car, multi passenger car, bus และ collision โดยค่า Heat Release Rate(HRR) 5, 15, 30 และ 45 MW ตามลำดับพบว่า ในสภาวะที่ไม่มีการระบายอากาศ ลำควันเคลื่อนที่ในลักษณะควันไหลใต้เพดานแบบจำกัด ความเร็ววิกฤต อุณหภูมิความร้อนสูงและขึ้นกับค่า HRR ในสภาวะที่มีการระบายอากาศ อุณหภูมิความร้อนด้าน upstream ลดลง และเกิดควันไหลย้อนเป็นผลจากความเร็วการระบายอากาศน้อยกว่าความเร็ววิกฤตของควันและตำแหน่งกองเพลิงที่เยื้อง การมองเห็นและเวลาการอพยพที่ด้าน upstream ได้รับผลกระทบลดลง คนจะต้องอยู่ห่างจากกองเพลิงและพ้นจากช่วงควันไหลย้อน

ABSTRACT

This research was to determine the effects of fire elevate and location on smoke movement and time of people evacuation in road tunnel of Thailand by using Fire Dynamics Simulator (FDS). The calculation domain of the tunnel was 8.5 meters wide, 5.4 meters high and 447 meters long. Fire accident with heat release rates of 5, 15, 30 and 45 MW were located in the tunnel center that occurred to passenger car, multi passenger car, bus and collision of vehicles. The results showed the smoke movement was confined ceiling jet, which the critical velocity and high temperature that depended on the heat release rates in natural ventilation conditions. The temperature of upstream area was decreased by mechanical ventilation systems and the occurrence of the black-layering length was happening when the ventilation velocity was less than the critical velocity of the smoke and fire location was eccentric. The effects of visibility and time of evacuation in the upstream were decreased when people were away from the fire and smoke reflux.

Key Words :ventilation, critical velocity, black-layering length

*Corresponding author; e-mail address : **fengnab@ku.ac.th**

[1]นิสิตปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบัน การก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดเพิ่มมากขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาการจราจร จากสถิติไฟไหม้ยานพาหนะในกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2542-2559 สำนักป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กรุงเทพมหานคร แนวโน้มการเกิดไฟไหม้เพิ่มขึ้น โดยมากที่สุด พ.ศ. 2558 รองลงมา พ.ศ. 2559 จำนวน 241 ครั้งและ 233 ครั้งตามลำดับ วารุณี (2018) วัสดุตกแต่งรถยนต์ส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลาสติกประเภทโพลิเมอร์ องค์ประกอบหลักของโครงสร้างโมเลกุลเป็นคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน ซึ่งติดไฟง่าย เมื่อถูกเผาไหม้จะปล่อยควันและแก๊สพิษออกมา คนส่วนใหญ่เสียชีวิตจากการสำลักควัน Woodburn *et al*. (1996) ศึกษาเชิงคำนวณด้วย (computational fluid dynamics, CFD) จำลองไฟไหม้ในอุโมงค์และใช้ kerosene เป็นเชื้อเพลิง HRR 2.7 kW พบว่าผลกระทบบริเวณรอบกองไฟที่ upstream ขึ้นกับตัวแปรความเร็วการระบายอากาศ สภาพการไหลแบบปั่นป่วน อัตราการปล่อยพลังงานความร้อน และที่ downstream ตัวแปรคือ การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน ความขรุขระของผิวผนัง ขอบเขตตำแหน่ง downstream ความลาดเอียง และสภาพการไหลแบบปั่นป่วน โดยการแผ่รังสีความร้อนและความขรุขระของผิวผนังเป็นตัวแปรที่ส่งผลมากที่สุด Kunsch *et al*. (2002) ศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายของแก๊สร้อน ประเมินค่า critical ventilation velocity, v_C เพื่อป้องกันควันไหลย้อนจากกองเพลิงพบว่า v_C จะขึ้นกับ HRR และจะเข้าใกล้ค่าคงที่เมื่อ HRR สูงและ Carvel *et al*. (2005) การแพร่กระจายของไฟในอุโมงค์ได้รับอิทธิพลจากขนาดอุโมงค์ การระบายอากาศตามแนวยาวและช่องว่างระหว่างรถ โดยระยะการแพร่กระจายของไฟในถนน 1 เลนมากกว่าถนน 2 เลน Vauquelina *et al*. (2006) อิทธิพลของความกว้างอุโมงค์(W) ส่งผลต่อการควบคุมควัน จากอัตราส่วน W/H พบว่า v_C ลดลงเมื่อ W มากขึ้น Hwang *et al*. (2016) ใช้ CFD วิเคราะห์ไฟไหม้ในอุโมงค์ 2 แห่งซึ่งขนาดแตกต่างกันภายใต้ HRR พบว่า อุณหภูมิมีค่าสูงที่ด้านบนของเพดาน กระจายความร้อนออกจากนั้นจึงค่อยๆ ลดลง Wu *et al*. (2000) ผลกระทบที่มีต่อ v_C คือความรุนแรงของไฟและลักษณะกายภาพของอุโมงค์ เมื่อ HRR สูง v_C จะเป็นอิสระจาก HRR และ Oka *et al*. (1995) ศึกษาการระบายอากาศเพื่อควบคุมการไหลของควันซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ในอุโมงค์พบว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด ตำแหน่งของกองเพลิงมีผลกระทบต่อความเร็ววิกฤต(v_C) Wang *et al*. (2016) ผลกระทบจากกองเพลิง 3 จุด ตามแนวรูปตัดขวางอุโมงค์(รูปโค้ง)พบว่า กองเพลิงที่จุดกึ่งกลางและซ้าย v_C 2.5 m/s ส่วนกองเพลิงด้านติดกับกำแพง v_C 2.8 m/s และกรณีที่มีควันไหลย้อยกลับเมื่อ $v < v_C$ ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และโครงสร้าง

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของลำควันจากกองเพลิงในอุโมงค์ทางลอด ใช้โปรแกรมจำลองพลศาสตร์อัคคีภัย (Fire Dynamics Simulator) โดยการจำลองลักษณะของการเคลื่อนที่ของไฟด้วยระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด(Finite Volume Method) แก้สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) สมการอนุรักษ์มวลย่อย (Conservation of Species) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \vec{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i''' \tag{2}$$

$$\rho\left(\frac{\partial}{\partial t}\vec{u} + (\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u}\right) + \nabla p = \rho\vec{g} + \vec{f} + \nabla\tau \qquad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla\cdot\rho h\vec{u} = \frac{Dp}{Dt} - \nabla\cdot q_r + \nabla\cdot k\nabla T + \sum_i \nabla\cdot h_i\rho D_i\nabla Y_i \qquad (4)$$

โดย ρ ความหนาแน่น $\vec{u}$ เวกเตอร์ความเร็ว Y_i เศษส่วนโดยมวลย่อยที่ i $\dot{m}_i'''$ อัตราการทำปฏิกิริยาต่อปริมาตรของมวลย่อยที่ i D_i สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลย่อยที่ i p ความดัน $\vec{f}$ แรงภายนอกที่กระทำต่อของไหล τ viscous stress tensor คือ h เอนทัลปี q_r ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน k สัมประสิทธิ์การนำความร้อน T อุณหภูมิ

สมการกลุ่มควันไหลใต้เพดาน

1. กลุ่มควันไหลใต้เพดานแบบอิสระ (unconfined ceiling jet) กลุ่มควันลอยตัวสูงขึ้นในแนวดิ่งกระทบเพดาน จากนั้นจะเปลี่ยนทิศทางการไหลในไปตามแนวเพดานอย่างอิสระ

อุณหภูมิที่ระยะ R ; $\quad R/H < 0.18 \qquad \Delta T_{cj} = 16.9\dfrac{\dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}}$ (5)

$R/H > 0.18 \qquad \Delta T_{cj} = 5.38\dfrac{\left(\dot{Q}/R\right)^{2/3}}{H}$ (6)

ความเร็วที่ระยะ R ; $\quad R/H < 0.15 \qquad u_{cj} = 0.96\left(\dfrac{\dot{Q}}{H}\right)^{1/3}$ (7)

$R/H > 0.15 \qquad u_{cj} = 0.195\left(\dfrac{\dot{Q}^{1/3}H^{1/2}}{R^{5/6}}\right)$ (8)

2. กลุ่มควันไหลใต้เพดานแบบจำกัด (confined ceiling jet) ลักษณะการไหลของกลุ่มควันไหลจะถูกบังคับโดยกำแพง Delichtsios 1981 พบว่า อัตราส่วนช่องว่างระหว่างคาน (W) ต่อความสูงของกองเพลิงถึงเพดาน (H) มีค่าระหว่าง 0.4-1.2 ($0.4 < W/H < 1.2$) และ L ระยะห่างจากกองเพลิงตามแนวคาน เมื่อ $L > W/2$

$$\frac{\Delta T_{cj}}{\Delta T_0} = 0.37\left(\frac{H}{W}\right)^{1/3} exp\left[-0.16\left(\frac{L}{H}\right)\left(\frac{W}{H}\right)^{1/3}\right] \qquad (9)$$

$$\frac{u_{cj}}{u_0} = \frac{0.27}{\left(W/H\right)^{1/3}} \qquad (10)$$

โดย u_{cj} ความเร็วของลำควัน u_o ความเร็วของลำควันที่ H ΔT_{cj} ผลต่างอุณหภูมิของลำควันไหลใต้เพดานกับอุณหภูมิอากาศ ($\Delta T_{cj} = T_{cj} - T_\infty$) ΔT_0 ผลต่างอุณหภูมิลำควันที่ H $\dot{Q}$ อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนกองเพลิง H ความสูงของผิวกองเพลิงถึงเพดาน

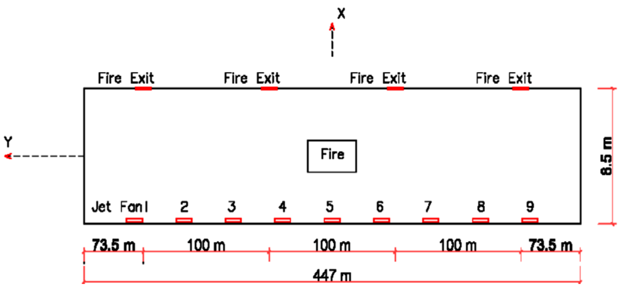


Figure 1 Tunnel fire experiment sketch.

Table 1 Type of Vehicles.

	Type of Vichicle	Dimension,m	HRR,MW
	Passenger car	1.8X4.6X1.45	5
	Multiple passenger car	2.0X7.0X2.70	15
	Bus	2.54X12.0X3.60	30
	Collision	_	45

HRR = อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนสูงสุดเนื่องจากอุบัติเหตุไฟไหม้รถ / การชนกันจนเกิดกองเพลิง

การสร้างแบบจำลอง ใช้คอมพิวเตอร์ CPU AMD Ryzen 7 2700U with Vega Mobile Gfx 2.20 GHz RAM 16.0 GB Hard disk 951.7GB และโปรแกรมพลศาสตร์ Pyrosim 2012 จำลองอุโมงค์ทางลอด(แบบจริง 2 ช่องทาง)โดยใช้ 1 ช่องทาง กว้าง 8.50 เมตร สูง 5.4 เมตร ยาว 447 เมตร 9 Jet Fans (APPROX 19.5 CMS) และกำหนดคุณสมบัติวัสดุ แบ่งชิ้นส่วนแบบจำลองออกเป็นชิ้นส่วนย่อย computation cell หรือ grid (Figure 1)เพื่อคำนวณหาค่าอุณหภูมิ ความเร็ว ระยะการมองเห็น สมมุติฐานไฟไหม้ยานพาหนะ (Table 1) ในสภาวะที่ไม่มีและมี 5, 9 Jet Fans ทำงาน จำลองพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนของการเผาไหม้ด้วยวิธี Large Eddy Simulation(LES)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

พฤติกรรมการไหลของควัน

ผลการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของลำควันในอุโมงค์ทางลอดจากอุบัติเหตุไฟไหม้ passenger car, multiple passenger car, bus และ collision โดย HRR เท่ากับ 5, 15, 30 และ 45 MW ทำให้เกิดกองเพลิงบริเวณกลางอุโมงค์ซึ่งเป็นจุดวิกฤตพบว่า สภาวะที่ไม่มีการระบายอากาศ ควันไฟจากการเผาไหม้ลอยตัวขึ้นในแนวดิ่งไปกระทบพื้นเพดานและเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ขนานตามแนวเพดานในลักษณะควันไหลใต้เพดานแบบจำกัด(confined ceiling jet) ใน 2 ทิศทางออกสู่ภายนอก ควันไฟจะสะสมตัวเป็นชั้นควันแล้วลอยลงต่ำกระจายไปทั่วอุโมงค์ (Figure 2-1a, 2-2 a) โดยกองเพลิง 45 MW ลำควันเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและมีอุณหภูมิความร้อนสูงสุด รองลงมาคือกองเพลิง 30, 15, 5 MW สภาวะที่มีการระบายอากาศโดยติดตั้งระบบระบายควันด้านบนของกำแพง ควันไฟจะถูกผลักไปยังด้าน downstream เพื่อออกสู่ภายนอกตามทิศทางของแรงลม ทำให้อุณหภูมิความร้อนและปริมาณควันที่ด้าน upstream ลดลง(Figure 2-1 b, c, 2-2 b, c) ลักษณะเปลวไฟของกองเพลิงลุกโชนจะโน้มเอียงไปตามแรงลมและผลจากตำแหน่งที่เยื้องกัน(Figure 3) กองเพลิง 15, 30 และ 45 MW เกิดควันไหลย้อนขนานเพดาน(Table 2) ซึ่งบริเวณที่ปะทะแรงลมน้อยควันไหลย้อนจะมีความยาวมาก Carvel *et al.* (2005) การป้องกันอัคคีภัยโดยควบคุมการระบายอากาศจึงเป็นการลดควันไหลย้อน ความเร็วการระบายอากาศ (v) $\geq$ ความเร็วของควัน (v_C) และ Kunsch *et al.* (2002) ความเร็ววิกฤตการระบายอากาศขึ้นกับความสูงของอุโมงค์

การมองเห็นและเวลาการอพยพคน

ผลการศึกษา พบว่าสภาวะที่ไม่มีการระบายอากาศ ลำควันเคลื่อนที่ขนานเพดานและแพร่กระจายอุณหภูมิความร้อนไปตลอดความยาวอุโมงค์ซึ่งปริมาณชั้นควันสะสมลอยตัวลงต่ำบดบังการมองเห็น ส่งผลต่อระบบการหายใจและการอพยพคน โดยกองเพลิง 45 MW ส่งผลกระทบมากที่สุด (Figure 2-2 a) สภาวะที่มีการระบายอากาศด้วยระบบระบายควัน ความร้อนและควันไฟถูกระบายไปที่ด้าน downstream ออกสู่ภายนอกทำให้ที่ด้าน upstream เป็นพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิความร้อน โดยกองเพลิง 5 MW ไม่พบปัญหาควันไหลย้อน ขณะที่กองเพลิง 45 MW ได้รับผลกระทบมากที่สุด ควันไหลย้อนมาจากกองเพลิงเป็นระยะ 85-100 เมตร(5 Jet Fans)และ 30-35 เมตร(9 Jet Fans)(Figure 2-2 b, c) การมองเห็นที่ Z=2 m ที่บางช่วงเวลายังเป็นอุปสรรค์ส่งผลกระทบต่อการอพยพคน(Figure 4, Table 2) โดยความปลอดภัยต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่คนอยู่ ระยะห่างจากกองเพลิงและบริเวณที่ควันไหลย้อนซึ่งจะส่งผลกระทบ(NFPA 520, 2017) การมองเห็นชัดเจนในระยะ30 m(100 ft.)

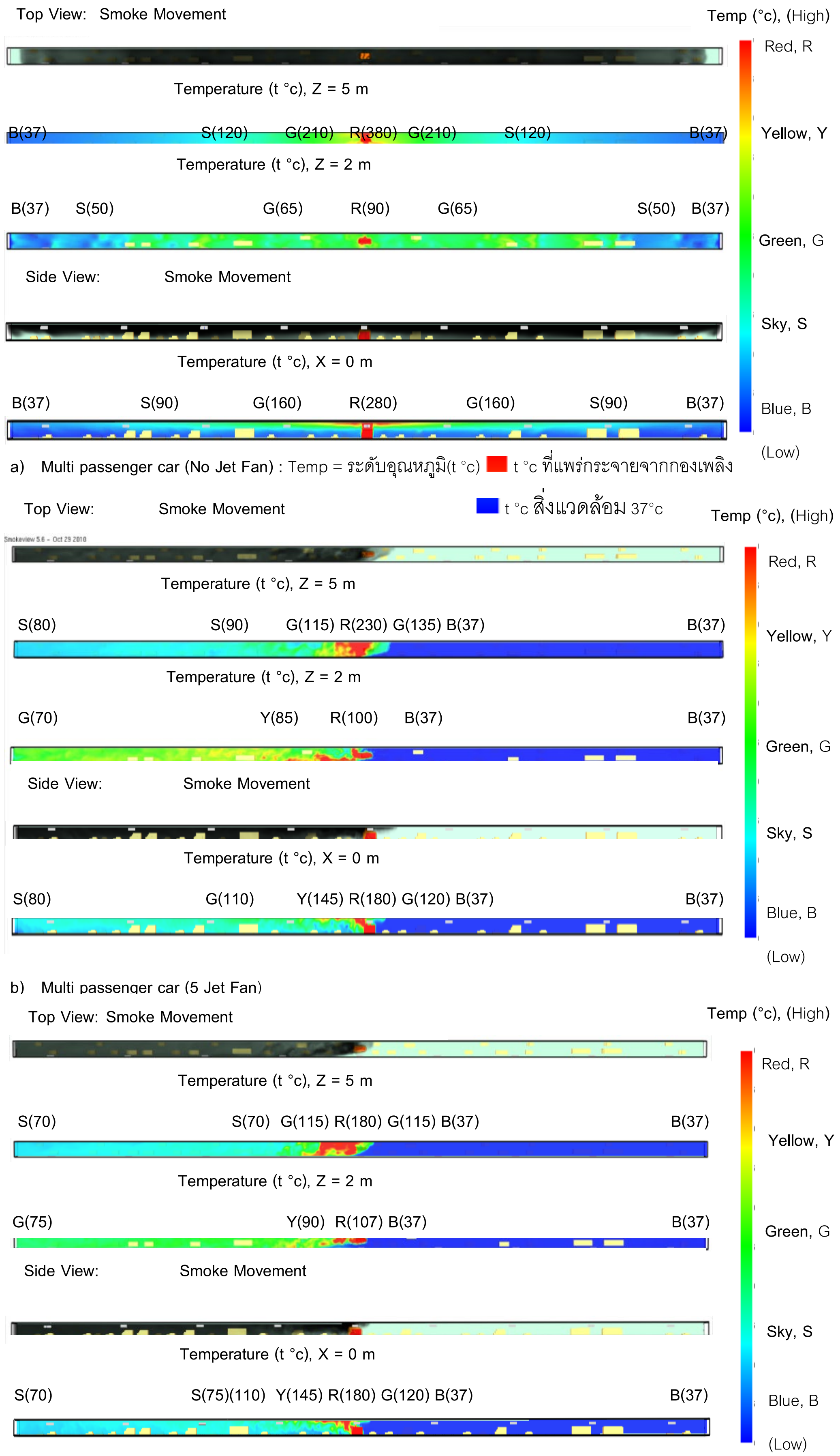


Figure 2-1 Temperature on the longitudinal of tunnel (Multi passenger car).

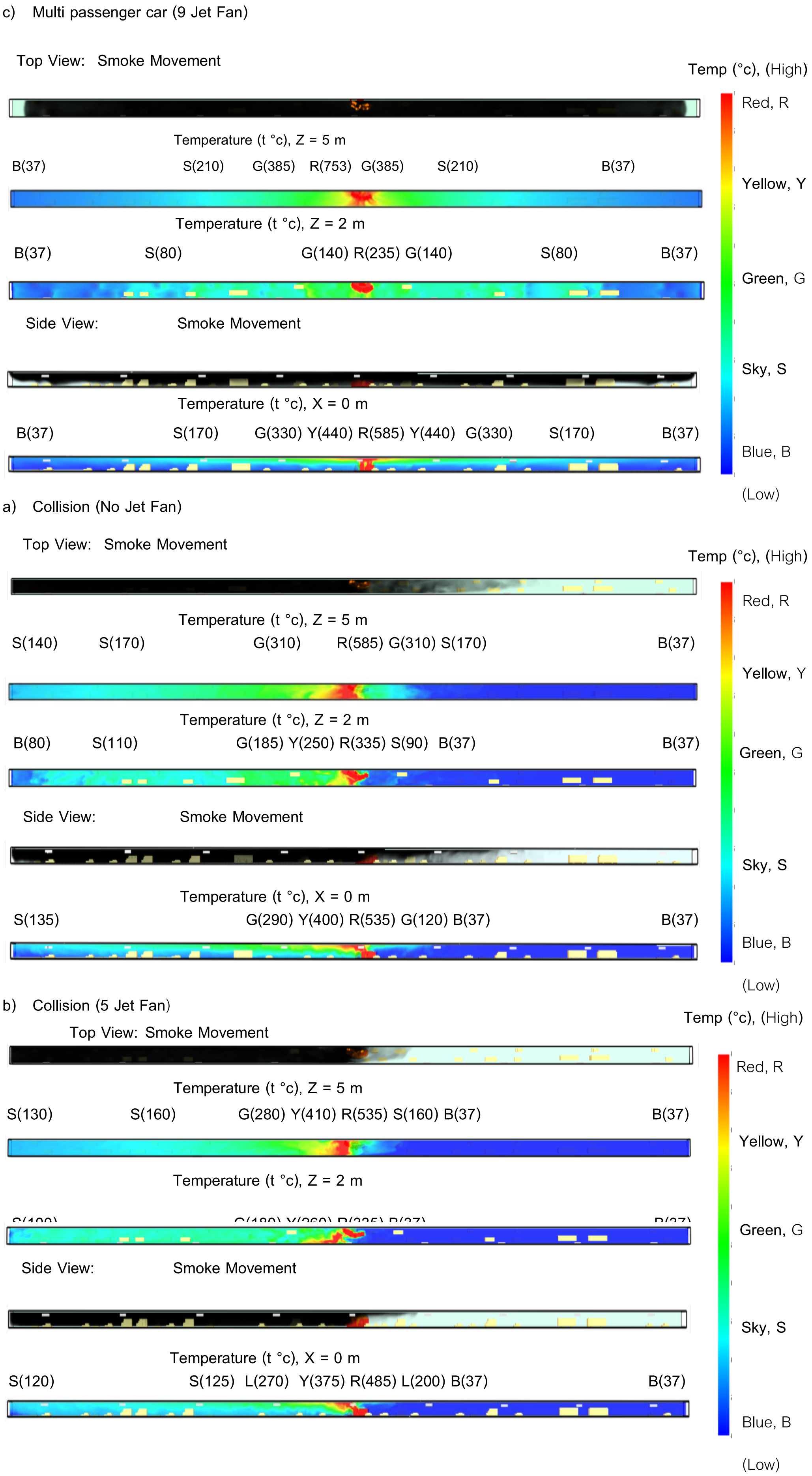
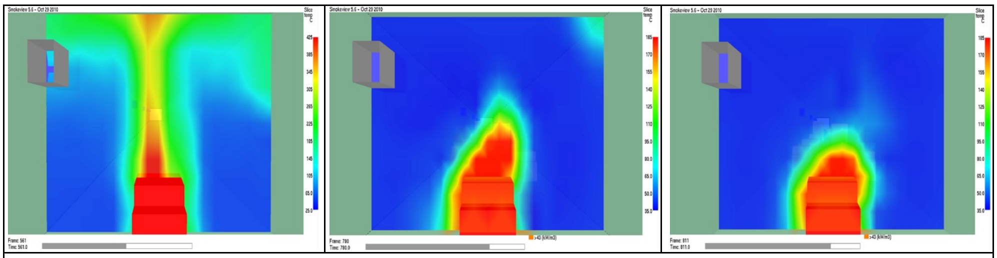
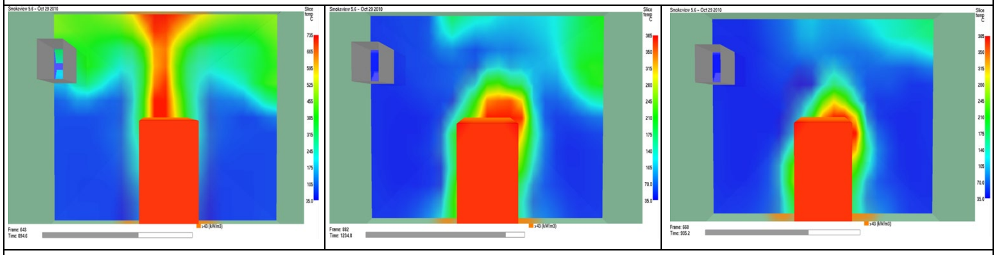


Figure 2-2 Temperature on the longitudinal of tunnel (Collision).

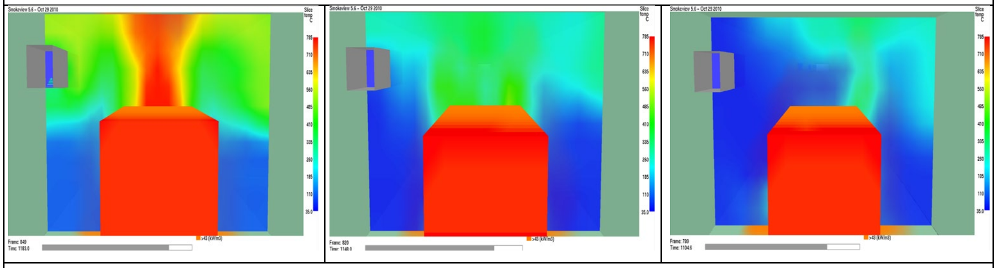
c) Collision (9 Jet Fan)



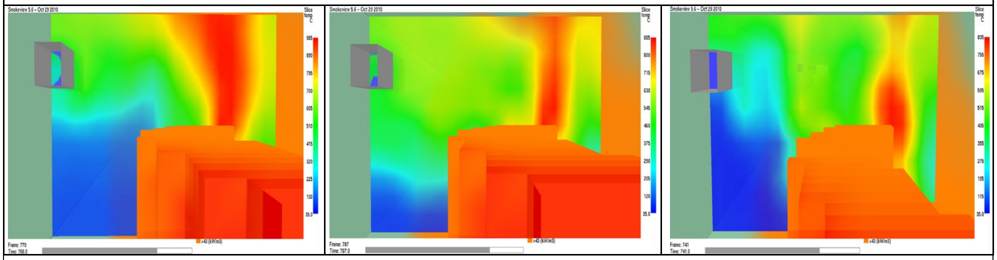
Passenger car a) No Jet Fan b) 5 Jet Fans c) 9 Jet Fans



Multi passenger car a) No Jet Fan b) 5 Jet Fans c) 9 Jet Fans



Bus a) No Jet Fan b) 5 Jet Fans c) 9 Jet Fans



Collision a) No Jet Fan b) 5 Jet Fans c) 9 Jet Fans

Figure 3 Temperature for Fire Accident of Vehicle for a middle.

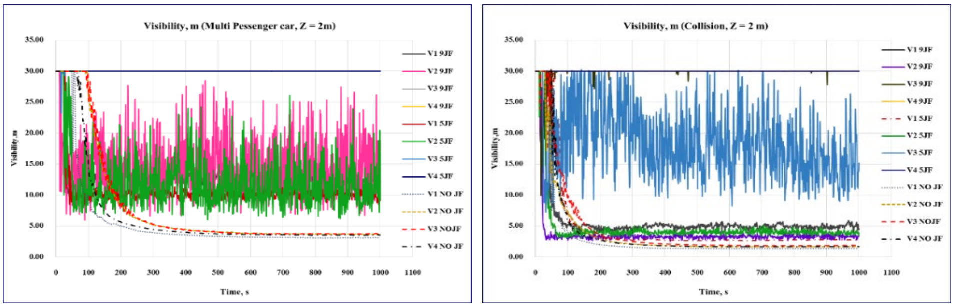


Figure 4 Visibility for Fire Accident of peoples: a) Multi passenger car b) Collision.

Table 2 Experimental Result.

Experimental Result	Location	Fire accident											
		Passenger car			Multiple passenger car			Bus			Collision		
		No JF	5 JF	9 JF	No JF	5 JF	9 JF	No JF	5 JF	9 JF	No JF	5 JF	9 JF
Back-layering length(m)	upstream		0	0		13-15	8.5-10		21-35	19-28		85-100	30-35
Vissibility(m) (Z=2 m)	downstream	<10	10-30	25-30	<10	7-30	15-25	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	upstream	<10	30	30	<10	30	30	<10	25-30	27-30	<10	10-30	30

สรุป

พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของลำควัน ช่วงแรกเป็นควันไหลใต้เพดานแบบอิสระจากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นควันไหลแบบจำกัดตามความยาวอุโมงค์ โดยความเร็วของควัน การแพร่กระจายความร้อนสัมพันธ์กับ HRR และตำแหน่งกองเพลิง การติดตั้งระบบระบายควันสามารถลดปริมาณควันและอุณหภูมิความร้อนที่ด้าน upstream ได้ แต่ต้องคำนึงถึงการป้องกันควันไหลย้อน ($v \geq v_C$) เนื่องจากพื้นที่ที่เกิดควันไหลย้อนมีผลต่อความปลอดภัยของคน ความชัดเจนในการมองเห็นโดยปราศจากสิ่งบดบัง การหายใจ และเวลาการอพยพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่โครงการวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2560. **พลศาสตร์อัคคีภัย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วารุณี ฟางทวานิช. 2018. พลาสติกกับการติดไฟ. **ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา สถาบันวิจัยศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย**. แหล่งที่มา: www.tistr.or.th/mtc/wp 24 สิงหาคม 2562

Carvel, R.O. 2005. Fire Spread between Vehicles in Tunnels Fire: Effects of Tunnel Size, Longitudinal Ventilation and Vehicle Spacing. **Fire Technology.** 41:271–304

Hwang, C.C. and J.C. Edward. 2005. The critical ventilation velocity in tunnel fires—a computer simulation. **Fire Safety Journal.** 213 :40–244

Kunsch, J.P. 2002. Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel. **Fire Safety Journal.** 37: 67–81

Oka, Y. and G.T. Atkinson. 1995. Control of Smoke Flow in Tunnel Fires. **Fire Safety Journal.** 25:305-322

Vauquelina, O. and Y. Wu. 2006. Influence of tunnel width on longitudinal smoke control. **Fire Safety Journal.** 40: 646–668

Wang, F. and M. Wang. 2016. A computational study on effects of fire location on smoke movement in a road tunnel, **Tunnelling and Underground Space Technology.** 51: 405–413

Woodburn, P.J. and R.E. Britter. 1996. CFD Simulations of a Tunnel Fire - Part I. **Fire Safety Journal.** 26: 35-62

Wu, Y. and M.Z.A. Bakar. 2000. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity. **Fire Safety Journal.** 35: 363-390

การศึกษาการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุในพืชโดยการใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

Plant Water and Nutrients Uptake Activity via Temperature Measurement

ปิยะรส มาลีเจริญ[1] ชนทัต บุญเฉลียว[1] และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์[1*]

Piyarose Maleecharoen[1] Chonnathat Boonchaliaw[1] and Taweedej Sirithanapipat[1*]

บทคัดย่อ

พฤติกรรมที่แสดงถึงการเจริญเติบโตและความสมบูรณ์ของพืชคือการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุ ซึ่งในปัจจุบันมีการศึกษากิจกรรมการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุในพืชใบเลี้ยงคู่หลากหลายวิธีการ โดยมีการศึกษาทั้งในห้องแลปของสถาบันการศึกษา รวมถึงเครื่องมือที่มีผลิตขายตามท้องตลาด ดังเช่น Sap Flow sensor ที่ใช้ในการวัดอัตราการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุ แต่เนื่องจากเครื่องมือชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูงสำหรับเกษตรกรในประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการออกแบบระบบการอุปกรณ์ตรวจวัดสภาวะแวดล้อมและการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุของต้นไม้ โดยระบบที่ทำการออกแบบจะอาศัยหลักการวัดอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างสองจุดเพื่อนำมาวิเคราะห์การไหลของน้ำและแร่ธาตุ ในการทดลองจะมีการใช้เซนเซอร์วัดอุณภูมิ คือ TMP36 และ Thermocouple โดย ทำการทดลองกับต้นไม้ 4 ชนิด ได้แก่ ต้นมะม่วง ต้นแคนา ต้นกันเกรา และต้นผกากรอง โดยทั้งหมดจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงมีการเชื่อมต่อเซนเซอร์กับ NodeMCU (ESP32 devkit v1) เพื่อส่งข้อมูลไปยัง Thingspeak ซึ่งเป็น Cloud Platform ผลการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการลำเลียงน้ำ โดยจะพบว่าพฤติกรรมการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุของต้นไม้สามารถตรวจจัดได้จากอุณหภูมิที่ต่างกัน

ABSTRACT

The factor that affects plant growth directly is the water and nutrients. Nowadays, the activity of transporting water and minerals in dicotyledon can be research in many ways including the laboratories of institutions and commercial equipment such as sap flow sensor, but this instrument has a relatively high price for agriculture in Thailand. Therefore, this research aims to study and design equipment to measure the transport of nutrients and water in the sapwood of the dicotyledon. The system design to measure the temperature difference between two points of tree trunk in order to analyze the flow of water and minerals. TMP36 and Thermocouple were used to measure temperature in sap layer of the trees: mango, Kankrao, Lantana and D.rheedii in the different environment. Then the sensors will be connected to microcontroller (ESP32 Devkit v1) to send data to Thingspeak. The result found that sensors can detect the behavior of water Nutrients Uptake Activity from the tree.

Key words: Sap Flow, IoTs, Temperature sensors

* Corresponding author; e-mail address: taweedej.s@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 1090

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปัจจุบัน การทำการเกษตรในประเทศไทยมีความพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างมาก และมีการประยุกต์ใช้หลักการ เทคโนโลยีต่าง ๆ ที่หลากหลายเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งการจะเพิ่มผลผลิตทางเกษตรนั้น เกษตรกรจะต้องทราบปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการเจริญเติบโตของพืช เพื่อให้สามารถดูแลพืชที่ปลูกได้อย่างถูกวิธีและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งพฤติกรรมภายในลำต้นของพืชใบเลี้ยงคู่ที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลาในหนึ่งวันหรือตามฤดูกาล ได้แก่ พฤติกรรมการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุที่เกิดขึ้นในลำต้น ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุในลำต้นของพืชใบเลี้ยงคู่ เพื่อช่วยให้เกษตรกรสามารถวางแผนการจัดการดูแลพืชได้ โดยใช้เครื่องมือช่วยวัดพฤติกรรมการลำเลียงแร่ธาตุและสารอาหารที่เกิดขึ้น การวัดอัตราลำเลี้ยงน้ำและแร่ธาตุในลำต้นของพืช (Smith and Allen,1996) นั้น โดยทั่วไปแล้วสามารถทำได้ 3 วิธี ได้แก่

- วิธีสมดุลความร้อน (Stem heat balance method)
- วิธีวัดคลื่นความร้อน (Heat pulse method)
- วิธีวัดการกระจายความร้อน (Thermal dissipation method)

การวัดด้วยการใช้ Sap Flow Meter (Figure 1) นั้นเป็นการวัดโดยตรงในลำต้นพืช (สุภัทร์, 2012) และมีการให้ความร้อนแก่ลำต้นพืช เพื่อวัดความต่างระหว่างอุณหภูมิ จึงสามารถทำให้เห็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของพืชชนิดนั้น ๆ ได้ โดยวัดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของลำต้น ซึ่งจะวัดจากพฤติกรรมของการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น แต่เนื่องราคาเครื่องมือค่อนข้างสูง (Brett *et. al*, 2018) ทางผู้วิจัยจึงได้มีการประยุกต์ออกแบบเครื่องมือในการอัตราการไหลภายในลำต้นพืช โดยเนื่องจากการไหลของน้ำและสารอาหารในลำต้นพืชจะเป็นการไหลจากรากไปสู่ใบ (David M. Hillis *et. al*, 2014) ดังนั้นจึงมีการวัดอุณหภูมิที่แตกต่างกันสองตำแหน่งตามแนวตั้ง เพื่อหาพฤติกรรมการลำเลียงที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของต้นไม้ และมีการใช้เซนเซอร์ที่หาได้ในท้องตลาด ซึ่งราคาไม่สูงมากนัก ประยุกต์เข้ากับเทคโนโลยี Internet of Things (IOTs) ด้วยการเชื่อมต่อผ่าน Wi-Fi เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการวัดไว้บน Cloud sever ซึ่งจะทำให้ลดการสูญหายของข้อมูล และสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ย้อนหลังได้ ทำให้เกษตรสามารถปรับปรุงวิธีการดูแลพืชให้เป็นไปตามความต้องการ ณ ขณะนั้น ซึ่งจะส่งผลให้การเพาะปลูกมีประสิทธิภาพมากขึ้น

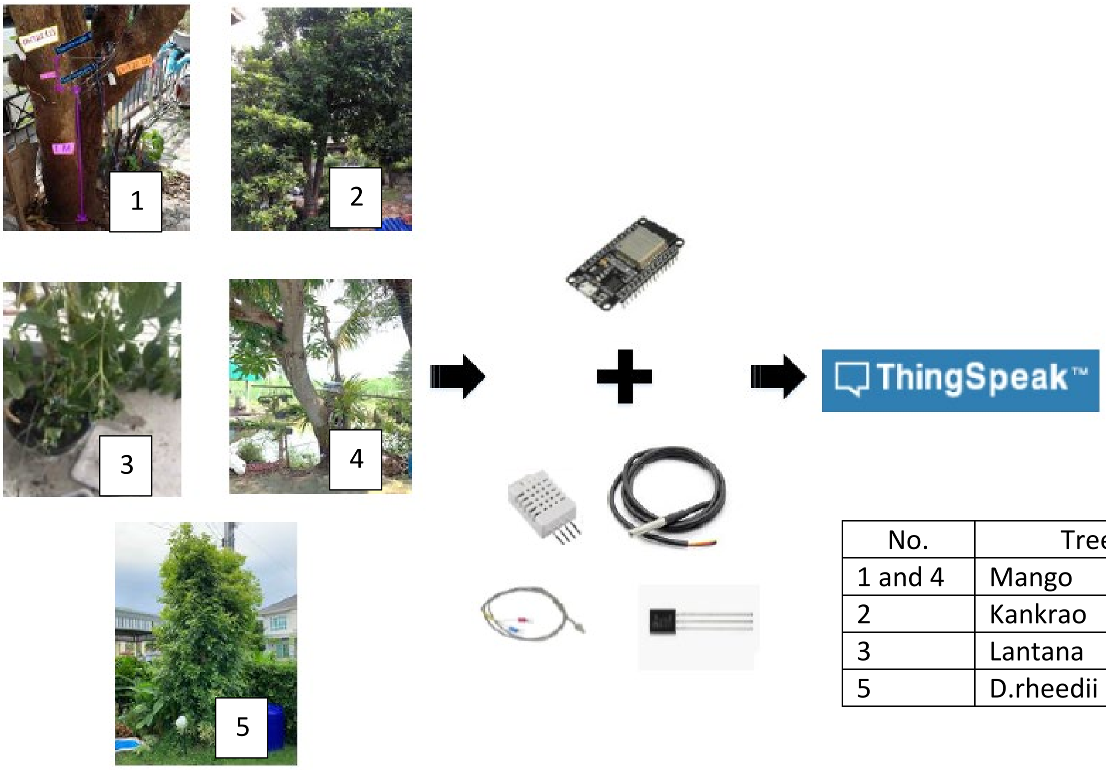
Figure 1 Sap Flow Meter.

(ที่มา : http://www.ictinternational.com/products/sfm1/sfm1-sap-flow-meter)

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การตรวจวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในลำต้นของต้นไม้

ในการทดลองจะมีการใช้เซนเซอร์ทั้ง TMP36 และ Thermocouple ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในต้นไม้ เพื่อทำการเปรียบเทียบแนวโน้มของอุณหภูมิที่วัดได้ในเซนเซอร์ทั้งสองชนิด โดยภาพรวมของระบบ (**Figure 2**) คือ เซนเซอร์จะส่งข้อมูลค่าที่วัดได้ไปยัง ESP32 devkit V1 ที่สามารถเชื่อมต่อกับ Wi-Fi ได้ จากนั้นจึงส่งต่อข้อมูลไปยัง Thingspeak ที่เป็น Cloud platform เพื่อเก็บและแสดงผลข้อมูลก่อนจะนำมาใช้ในงานวิเคราะห์ต่อไป



No.	Tree
1 and 4	Mango
2	Kankrao
3	Lantana
5	D.rheedii Seem

Figure 2 The overview system.

ไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

- **ESP32 devkit V1** คือ บอร์ดที่รองรับการเชื่อมต่อ Wi-Fi และ Bluetooth 4.2 BLE
- **DHT 22** คือ โดยสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 80 องศาเซลเซียส ความคลาดเคลื่อน ± 0.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์วัดได้ในช่วง 20 ถึง 90 % ความคลาดเคลื่อน ± 2%
- **DS18B20** คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่มี probe กันน้ำ สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -55 ถึง 125 องศาเซลเซียส ความคลาดเคลื่อน ± 0.5 องศาเซลเซียส (DALLAS, 2015)
- **Thermocouple** งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ thermocouple type K ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -270 ถึง 1260 องศาเซลเซียส โดยมีความคลาดเคลื่อนที่ ± 2.2 องศาเซลเซียส

- TMP36 คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 125 องศาเซลเซียส ความคลาดเคลื่อนในการวัดอยู่ที่ ± 2 องศาเซลเซียส

การบันทึกและเก็บข้อมูลบน Cloud platform

ในการทดลองนี้จะมีการเลือกใช้ cloud platform คือ Thingspeak ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อใช้เป็นที่เก็บข้อมูลของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงาน IOTs (ปิยะรส, 2018) ซึ่งข้อมูลที่บันทึกได้จะถูกนำมาวิเคราะห์แนวโน้มต่อไป (Figure 3)

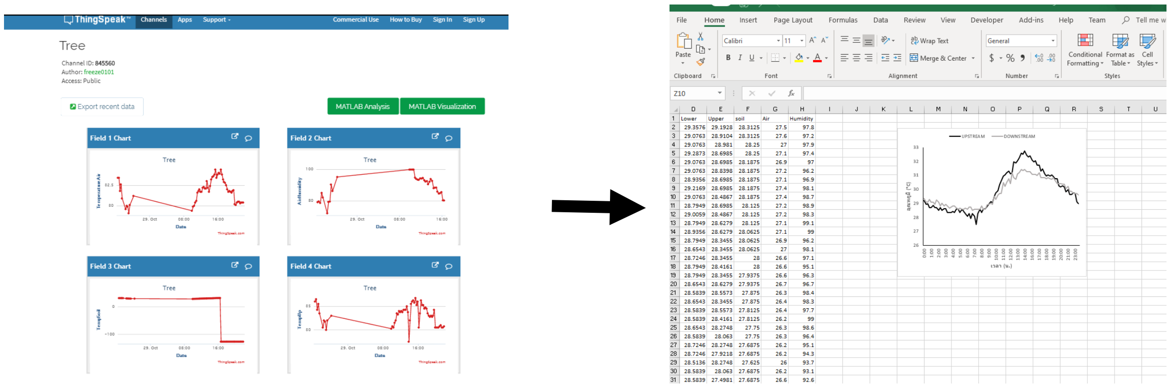


Figure 3 Data transmission from Thingspeak to csv file.

วิธีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิในลำต้นของต้นไม้

ในการทดลองนี้จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดตามตำแหน่งต่าง ๆ โดยจะมีการติดตั้งเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิในต้นไม้ทั้งหมด 2 จุด ในอากาศ 1 จุด และในพื้นดิน 1 จุด (Figure 4) ซึ่งระยะ a จะมีค่า 10 เซนติเมตร ในต้นกันเกรา ระยะ 15 เซนติเมตรในต้นมะม่วง (1) และต้นผกากรอง และมีระยะ 100 เซนติเมตรในต้นมะม่วง (2) และต้นแคนา ส่วนระยะ b จะมีค่า 60 เซนติเมตร ในต้นกันเกรา ระยะ 20 เซนติเมตรในต้นผกากรอง ระยะ 100 เซนติเมตรในต้น มะม่วง (2) และมีระยะ 30 เซนติเมตรในต้นมะม่วง (2) และต้นแคนา สำหรับระยะ c จะมีค่า 20 เซนติเมตร ในการทำการทดลองจะมีการแบ่งเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิในลำต้นพืชเป็นสองกลุ่มคือ TMP36 และ Thermocouple โดยจะมีการใช้ TMP36 วัดอุณหภูมิในต้นมะม่วง (2) และต้นแคนา ส่วน Thermocouple วัดอุณหภูมิในต้นมะม่วง (1) กันเกรา และผกากรองตามลำดับ โดยอุณหภูมิในพื้นดินจะใช้ DS18B20 ทำการวัดในระยะที่ลึกลงไป 20 เซนติเมตร และอุณภูมิอากาศในอากาศจะถูกวัดโดย DHT22 การเก็บข้อมูลจะทำทั้งหมด 7 วัน เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของพืชนิดต่าง ๆ กันในการลำเลียงน้ำและสารอาหารจากรากสู่ปลายยอดของลำต้น

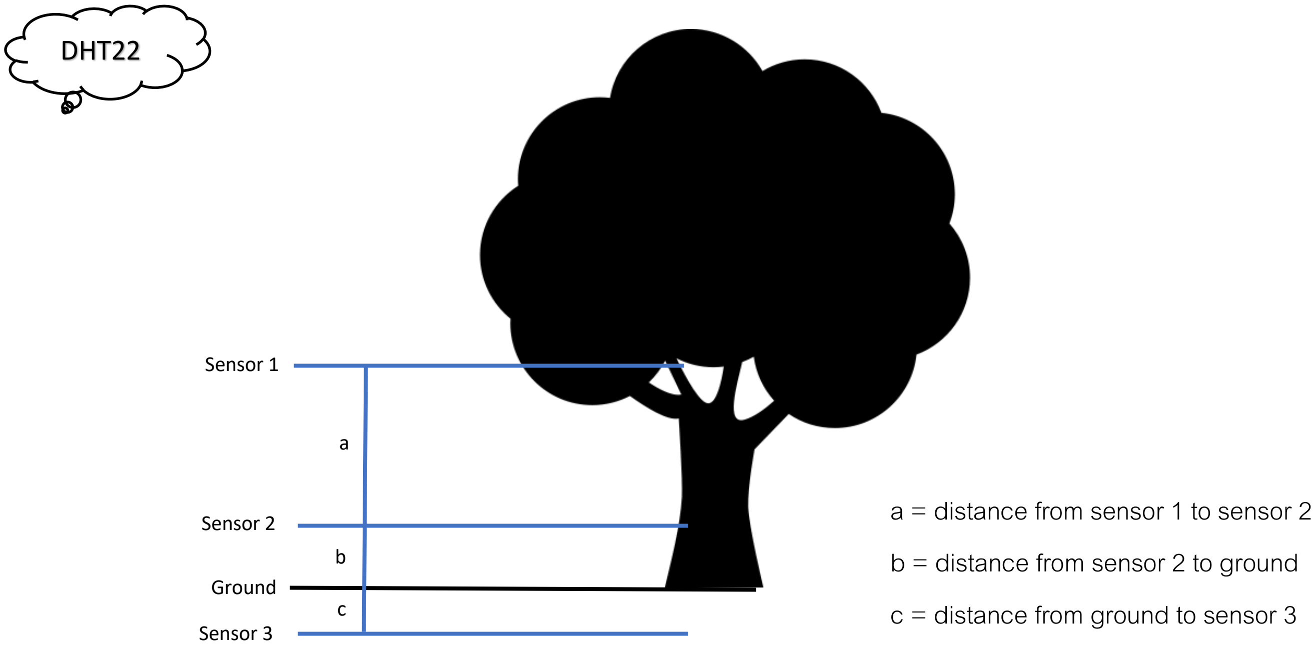
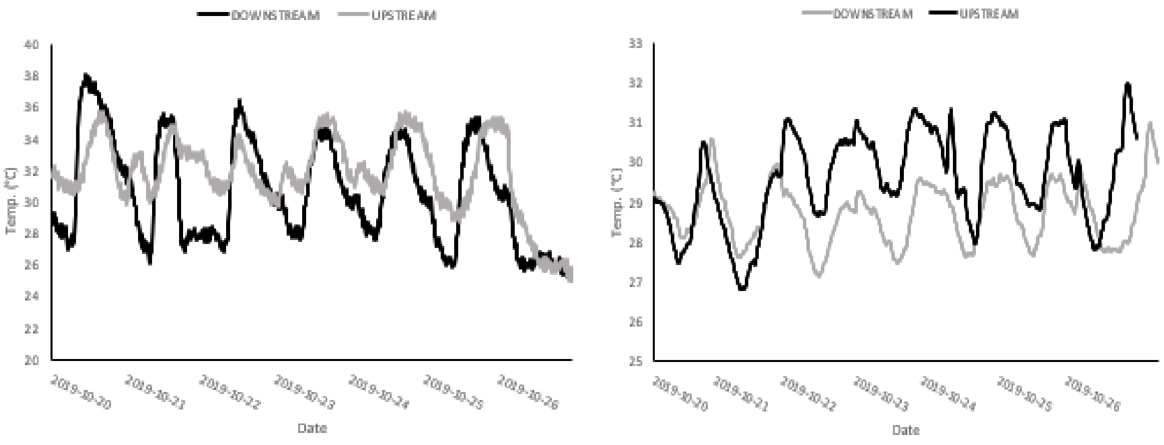


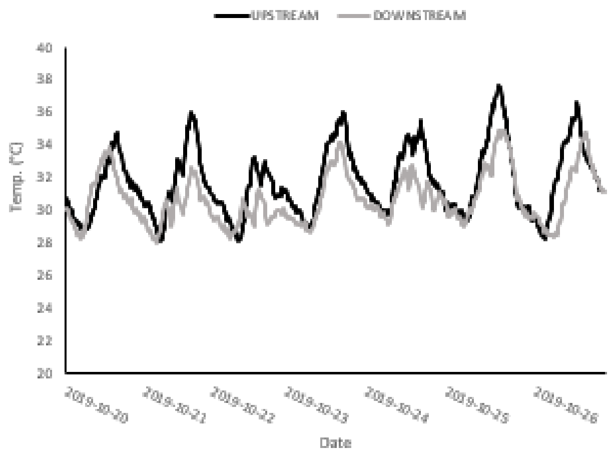
Figure 4 The position of sensors on the tree.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

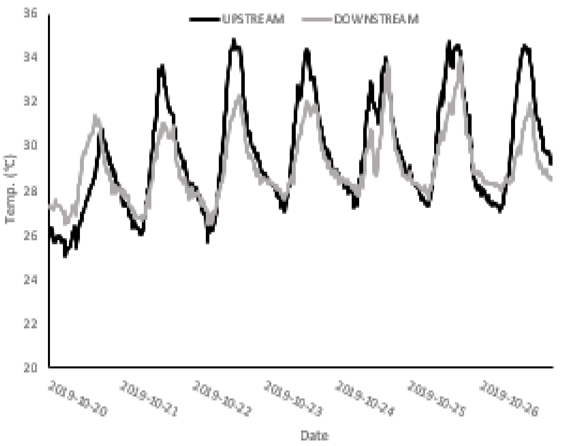
จากการทดลองผลการวัดอุณหภูมิภายในลำต้นโดยใช้เซนเซอร์ TMP 36 และ Thermocouple พบว่า พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงเวลา 7 วัน จะพบว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนจะมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกันในต้นไม้ทั้ง 4 ชนิด (Figure 5) โดยจะมีอุณหภูมิต่ำในช่วงกลางคืน และมีอุณหภูมิสูงในช่วงกลางวัน และจะสูงที่สุดในช่วงเที่ยงวัน เป็นแสดงให้ว่ามีการลำเลียงเกิดขึ้นภายในลำต้นมากในช่วงที่มีแดดมาก โดยมีทิศทางการลำเลียงจะเริ่มจากส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่า(Downstream) ไปสู่ส่วนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า (Upstream)



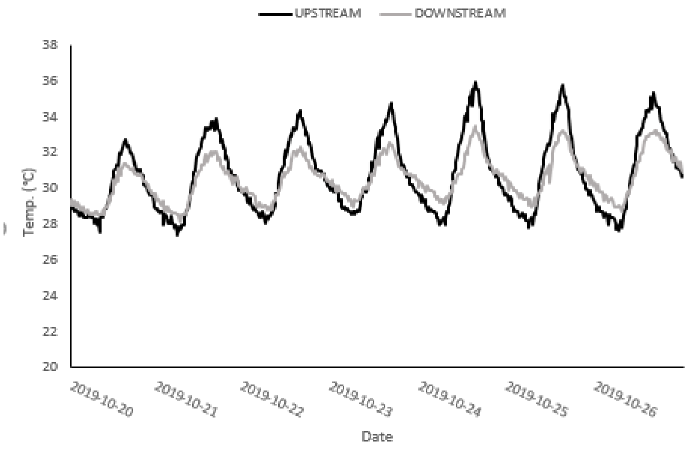
(a) (b)



(c)



(d)



(e)

Figure 5 The graph shows temperature changes within the tres in 7 days. (a) mango tree (1) (b) Kankrao (c) Lantana were measured trunk's temperature by Thermocouple (d) mango tree (2) (e) D.rheedii Seem were measured trunk's temperature by TMP36 .

จากผลการวัดอุณหภูมิในรอบ 24 ชั่วโมงของต้นมะม่วง (2) ที่ทำการวัดโดยใช้เซนเซอร์ TMP36 พบว่าอุณหภูมิจะมีค่า 27-29 องศาเซลเซียสในช่วง 0.00 – 7.00 น. จากนั้นจะเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสูงสุดประมาณ 33 องศาในช่วง 14.00 น. ก่อนจะลดลงจนถึงช่วง 29 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่า (Downstream) จะตัดกับ อุณหภูมิสูงกว่า (Upstream) ในช่วงเวลา 9.00 น. ที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส และเวลา 19.00 น. ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ส่วนอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิในชั้นดินที่วัดได้นั้น จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศ มีความสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปภายในลำต้นของต้นไม้ (Figure 6, Figure 7) โดยเมื่ออุณหภูมิในอากาศเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่วัดได้ในลำต้นก็เพิ่มขึ้นไปด้วย แต่อุณหภูมิในดิน (Figure 7) นั้น มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 27.5 - 29.5 องศาเซลเซียส สำหรับความชื้นในอากาศ (Figure 8) นั้นจะมีความสัมพันธ์กับการลำเลียง โดยเมื่อความชื้นต่ำ แสดงถึงอากาศแห้ง ปากใบพืชจะเปิดเพื่อคายน้ำ ดังนั้นการลำเลียงก็จะมีอัตราเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นโดยรอบสูง ปากใบจะปิด ทำให้อัตราการลำเลียงต่ำไปด้วย

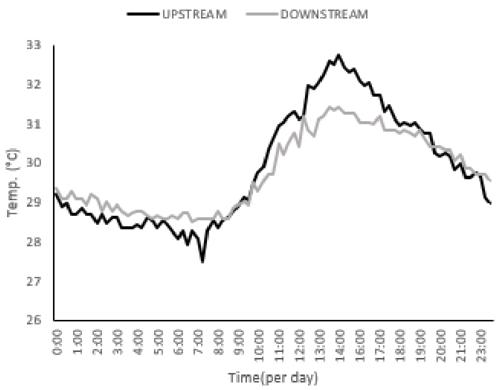


Figure 6 Temperature changes within trunk of mango tree in 7 days.

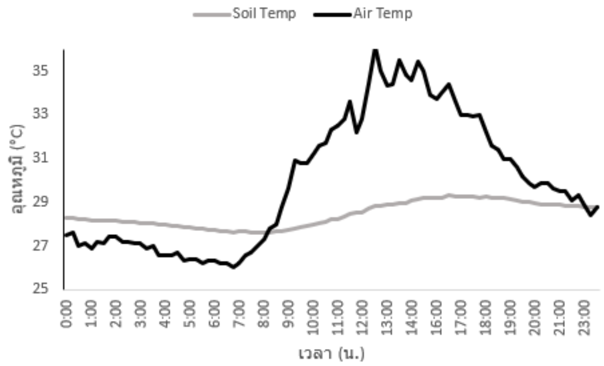


Figure 7 Variation of air temperature around mango tree (2) and soil temperature within mango tree (2)'s Trunk in one day.

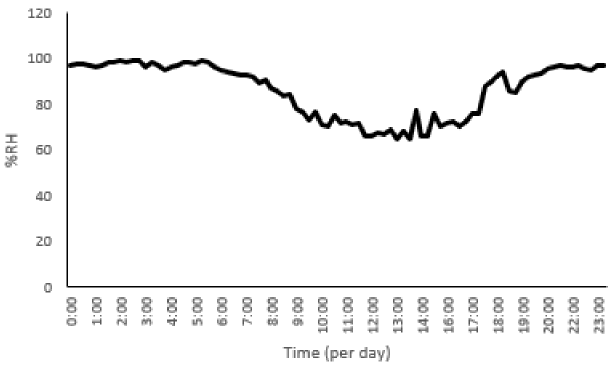


Figure 8 Variation of Humidity around mango tree (2)'s Trunk in one day

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเก็บค่าอุณหภูมิและวิเคราะห์ผลอุณหภูมิภายในต้นพืชทั้งหมด 4 ชนิดคือ มะม่วง กันเกรา แคนา และผกาารอง พบว่าพฤติกรรมการลำเลียงน้ำและสารอาหารที่ตรวจวัดได้ มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยกราฟที่ได้ในช่วง 7 วันของทั้ง 4 ต้นจะมีความชันเพิ่มขึ้นเมื่อต้นไม้ได้รับแสงแดด โดยจะมีอุณหภูมิสูงสุด ในช่วง 11.00- 14.00 น.ของทุกวัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าต้นไม้มีการลำเลียงน้ำและสารอาหารมากขึ้นเมื่อได้รับ แสงแดดมากขึ้น รวมถึง ทั้ง TMP36 และ Thermocouple สามารถใช้งานเพื่อตรวจวัดแนวโน้มพฤติกรรมการ ลำเลียงน้ำและแร่ธาตุของต้นไม้ได้โดยอาศัยความต่างของอุณหภูมิสองจุดตามแนวตั้งของลำต้นได้ ซึ่งการใช้งาน

จะมีความต่างจาก sap flow meter ที่วางขายตามท้องตลาด โดยจะไม่มีการให้ความร้อนแก่ต้นพืช ในอนาคตสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางการเกษตรเพื่อให้หาความต้องการของพืช ณ ขณะนั้น ๆ ได้อย่างแม่นยำ เป็นการช่วยเกษตรกรพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพผลผลิตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ห้องวิจัย PID ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล นิสิต 01208577 หมู่1 และ หมู่ 619 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ข้อมูลในการทำวิจัย และ ดร. ชินวัฒน์ ยัพวัฒนพันธ์ ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยและแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Smith, D.M. and S.J, Allen. 1996. Measurement of sap flow in plant stems. **Journal of Experiment Botany** 47:1833-1844

สุภัทร์. 2012. การประมาณความต้องการน้ำของไม้ยืนต้นทางเศรษฐกิจเพื่อการให้น้ำที่เหมาะสม. **แก่นเกษตร** 40:279-290

Brett Stoddard et al. 2019. **Thermal Sap Flow** (Online). http://www.open-sensing.org/sapflowmeter , 26 ตุลาคม, 2563

David M. Hillis et al. **The Pressure Flow Model** (Online). http://pol2e.com/Animated%20Tutorials/pol2e_at_2504_The_Pressure_Flow_Model/pol2e_at_2504_The_Pressure_Flow_Model_scr.html, 27 ตุลาคม, 2563

DALLAS. 2015. **DS1820 1WireTM Digital Thermometer Datasheet** (Online). http://narong.ece.engr.tu.ac.th/microlab/document/ds1820.pdf, 25 ตุลาคม, 2563

ICT International. **Sap Flow Meter** (Online). http://www.ictinternational.com/products/sfm1/sfm1-sap-flow-meter, 25 ตุลาคม, 2563

ปิยะรส. 2018. **การออกแบบและพัฒนาระบบติดตามสภาพแวดล้อมสาหรับกระบะเพาะเลี้ยงต้นกล้ากล้วยแบบเรียงซ้อน** (Online). http://www.tsme.org/menett/menett2019/fullpaper/DRC/DRC003.pdf, 20 ตุลาคม 2563

การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพในการโดยสารของรถไฟฟ้าบีทีเอสชนิด EMU-A1 และ EMU-B1 บนเส้นทางสายสุขุมวิทจากสถานี N8 ถึง สถานี E14

A Comparative Study of Ride Quality between EMU-A1 and EMU-B1 Trains of BTS on Sukhumvit Line from N8 to E14 Stations

คณวรรธก์ ใจสะอาด[1,2] วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร์[1] และ วิชัย ศิวะโกศิษฐ[1*]

Kanawat Jaisaard[1,2], Wiroonsak Santipach[1], and Wichai Siwakosit[1*]

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงการศึกษาเปรียบเทียบค่าคุณภาพในการโดยสารของรถไฟฟ้าบีทีเอสชนิด EMU-A1 และ EMU-B1 ที่ให้บริการบนเส้นทางสายสุขุมวิทจากสถานี N8 (หมอชิต) ไปถึงสถานี E14 (แบริ่ง) โดยการคำนวณค่าเวอร์ตุงซาลจากความเร่งของขบวนรถไฟในแนวยาว แนวดิ่ง และแนวขวาง จากการเคลื่อนที่ของรถไฟผ่าน 21 ช่วงสถานี และนำมาเปรียบเทียบกับคุณภาพในการโดยสารตามมาตรฐาน ISO 2631 ผลการคำนวณจากค่าความเร่งในแนวยาว แนวดิ่ง และแนวขวาง แสดงให้เห็นว่ารถไฟฟ้าทั้งสองขบวนมีคุณภาพในการโดยสารในเกณฑ์ปกติ โดยรถไฟฟ้า EMU-A1 มีคุณภาพในการโดยสารที่ดีกว่ารถไฟฟ้า EMU-B1 บนเส้นทางสายสุขุมวิทในแนวตามยาว แนวดิ่ง และแนวขวาง โดยเฉลี่ยที่ร้อยละ 6.60 5.25 และ 4.21 ตามลำดับ

ABSTRACT

This paper presents a comparative study of ride quality between BTS's EMU-A1 and EMU-B1 on Sukhumvit line from N8 (Morchit) to E14 (Bearing) stations by using Wertungzahl values, which are calculated from longitudinal, vertical, and lateral accelerations of the trains from 21 intervals of stations. The results are then compared with ride quality values according to ISO 2631 standard and indicate that both of them are having normal ride quality. EMU-A1 has better ride quality than EMU-B1 on Sukhumvit line. The average improvement on longitudinal, vertical, and lateral directions are 6.60%, 5.25%, and 4.21% respectively.

Key words: ride quality, train, Wertungzahl, ISO 2631

* Corresponding author; e-mail address: wichai.s@ku.ac.th

[1]ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]KURAIL, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพจำกัด (มหาชน) กรุงเทพฯ 10900

[2]Bangkok Mass Transit System PLC. (BTSC) Bangkok 10900

คำนำ

การเดินทางในเขตเมืองกรุงเทพมหานครในปัจจุบันมีการใช้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นการเดินทางที่สามารถควบคุมเวลาได้ดีและหลีกเลี่ยงปัญหารถติดได้ บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพจำกัด (มหาชน) หรือ บีทีเอส ได้ให้บริการเดินรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท และ รถไฟฟ้าสายสีลม ตั้งแต่วันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ. 2542 โดยในปัจจุบันมีการให้บริการรถไฟฟ้าห้าชนิดคือ EMU-A1 (Siemens) EMU-B1 (CRRC Changchun) EMU-B2 (CRRC Changchun) EMU-A2 (Siemens เพิ่งเริ่มให้บริการในปี พ.ศ. 2562) และ EMU-B3 (CRRC Changchun กำลังทดสอบขบวนรถ) บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพจำกัด (ม.ป.ป.) การศึกษานี้เปรียบเทียบความสบายในการโดยสารระหว่างรถไฟฟ้า EMU A1 และ EMU B1 ตามรูปที่ 1 บนเส้นทางสายสุขุมวิทระหว่างสถานี N8 (หมอชิต) ถึงสถานี E14 (แบริ่ง) ซึ่งรถไฟฟ้าทั้งสองชนิดมีลักษณะการตอบสนองในขณะวิ่งให้บริการที่แตกต่างกัน การศึกษานี้ต้องการแสดงให้เห็นว่าคุณภาพในการโดยสาร (Ride Quality) ของรถไฟฟ้าทั้งสองชนิดนั้นมีค่าอยู่ในระดับใด และมีความแตกต่างกันหรือไม่ในการให้บริการแก่ผู้โดยสารในแต่ละช่วงสถานีบนเส้นทางสายสุขุมวิท

Figure 1 EMU-A1 (Left) and EMU-B1 (Right) Source: โอเคเนชั่น (2553).

อุปกรณ์และวิธีการ

คุณภาพในการโดยสาร

คุณภาพในการโดยสารหมายถึงการโดยสารยานพาหนะที่ไม่มีความสั่นสะเทือนหรือแรงที่มากระทำต่อผู้โดยสารในระหว่างที่เคลื่อนที่ที่มากจนเกินไป โดยสามารถแสดงค่าคุณภาพในการโดยสารได้จากค่าเวอร์ตุงซาล (Wertungzahl) Wz (Andersson *et al.*, 2014) ซึ่งคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ของความเร่งในห้องโดยสารที่มีการปรับตามค่าถ่วงน้ำหนักความถี่ (Frequency Weighted) a^{wrms} ตามสมการ

$$Wz = 4.42(a^{wrms})^{0.3} \quad (1)$$

$$a^{wrms} = \left[\frac{1}{T}\int_0^T [a^w(t)]^2 dt\right]^{0.5} \quad (2)$$

โดย T คือคาบเวลาที่ใช้คำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสองและ $a^w(t)$ คือความเร่งในห้องโดยสารที่มีการปรับตามค่าถ่วงน้ำหนักความถี่ตามรูปที่ 2 โดยเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 2631 ซึ่งมีการถ่วงน้ำหนักความเร่งในแนวดิ่ง (Vertical) ของตัวรถเป็น w_k และมีการถ่วงน้ำหนักความเร่งในแนวตามยาว (Longitudinal) และแนวขวาง (Lateral) ของตัวรถเป็น w_d ค่า Wz ที่เป็นปกติของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 2.8 โดยมีเกณฑ์ความสั่นสะเทือนในการโดยสารและคุณภาพในการโดยสารเทียบกับค่า Wz ตามตารางที่ 1 (Andersson *et al.*, 2014)

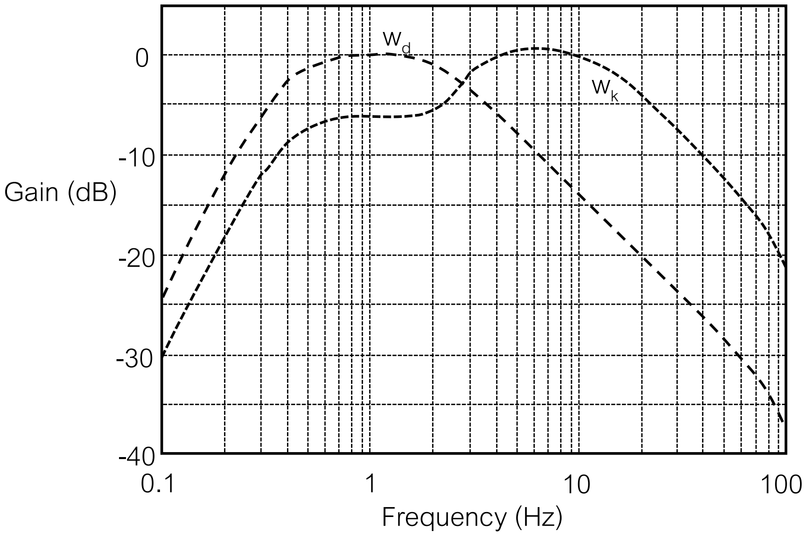


Figure 2 Frequency weighting of vertical (w_k), longitudinal, and lateral (w_d) accelerations according to ISO 2631 Source: Andersson *et al*. (2014).

Table 1 Level of vibrations and ride comfort according to Wz.

Wz	Vibration Level	Ride Quality
1	Just noticeable	Very good
2	Clearly noticeable	Good
2.5	Pronounced but not unpleasant	-
3	Strong but tolerable	Tolerable
3.5	Very stong and unpleasant	-
4	Extremely strong and unplesant	Not tolerable
5	-	Dangerous

Source: Andersson *et al*. (2014)

การวัดค่าความเร่งและการประมวลผล

อุปกรณ์วัดค่าความเร่งที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นชนิด Extech VB300 3-Axis Accelerometer Data Logger ทำการบันทึกค่าความเร่งในแนวดิ่ง แนวตามยาวตัวรถไฟ และแนวขวางตัวรถไฟ โดยทำการบันทึกค่าทุก 0.05 วินาที ซึ่งเท่ากับความถี่ 20 Hz ตลอดเส้นทางสายสุขุมวิท มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเร่งที่บริเวณห้องพนักงานขับรถที่หัวขบวนรถไฟฟ้า EMU-A1 และ EMU-B1 ที่บริเวณพื้นห้องคนขับเพื่อป้องกันการรบกวน

การให้บริการแก่ผู้โดยสาร หลังทำการวัดนำข้อมูลมาคำนวณตามรูปที่ 2 และสมการที่ 1 และ 2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB™ โดยมีการคำนวณค่า Wz ระหว่างการเดินรถในสายสุขุมวิทจากสถานี N8 (หมอชิต) ไปถึงสถานี E14 (แบริ่ง) รวม 22 สถานี 21 ช่วงของการเคลื่อนที่ และทำการเปรียบเทียบค่าคุณภาพในการโดยสารระหว่างขบวนรถไฟทั้งสองต่อไปว่าอยู่ในระดับใดและมีความแตกต่างกันอย่างไรในแต่ละช่วง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตัวอย่างค่าความเร่งที่ได้จากการวัดระหว่างสถานี N8 (หมอชิต) และ N7 (สะพานควาย) ของรถไฟฟ้า EMU-A1 และ EMU-B1 เป็นไปดังรูปที่ 3 และ 4 สังเกตได้ว่าการพิจารณาการสั่นสะเทือนจากค่าความเร่งในทุกแนวไม่สามารถแยกแยะระดับการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกันระหว่าง EMU-A1 และ EMU-B1 ได้อย่างชัดเจน

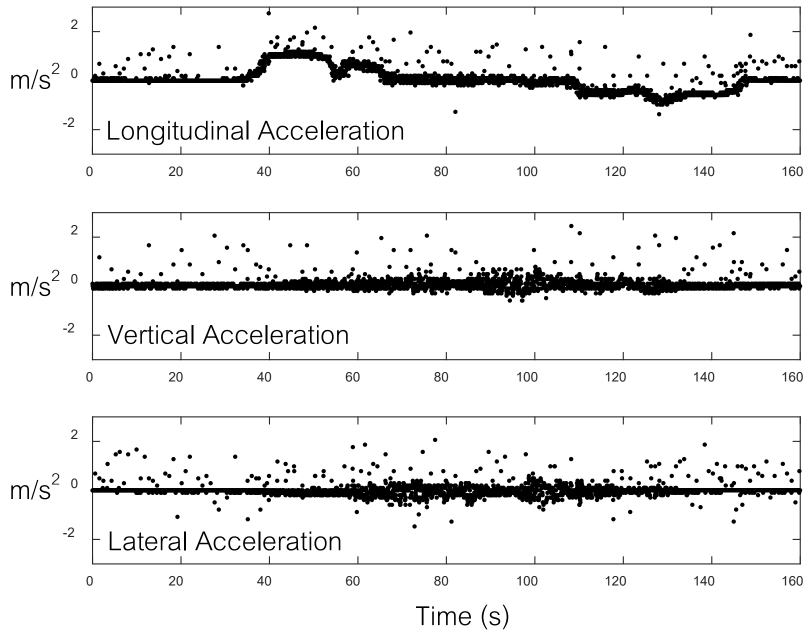


Figure 3 Longitudinal, vertical, and lateral accelerations of EMU-A1 from N8 to N7 on Sukhumvit line.

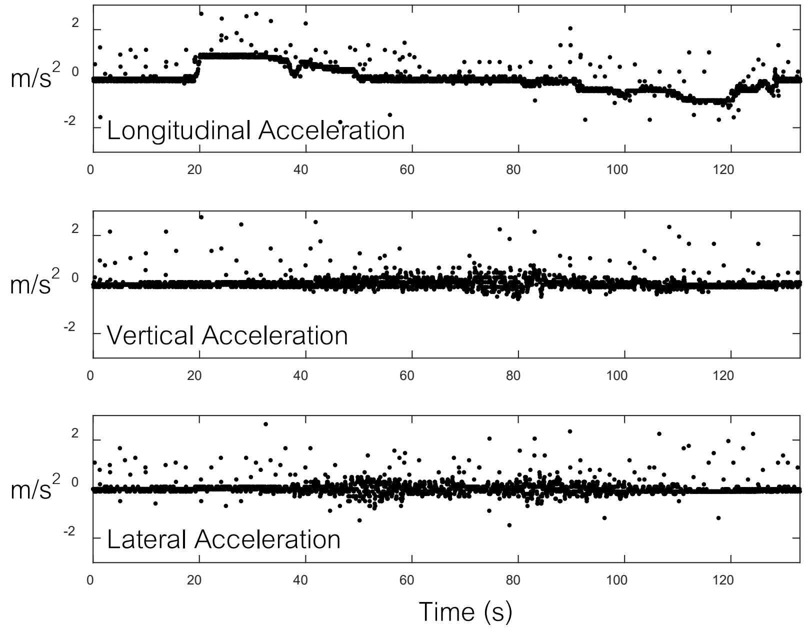


Figure 4 Longitudinal, vertical, and lateral accelerations of EMU-B1 from N8 to N7 on Sukhumvit line.

คุณภาพของการโดยสารสามารถแสดงได้จากการคำนวณค่า Wz ของ EMU-A1 และ EMU-B1 ในทุกช่วงสถานี โดยสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ สังเกตว่าไม่มีสถานี N6 เนื่องจากยังไม่มีการสร้างสถานี

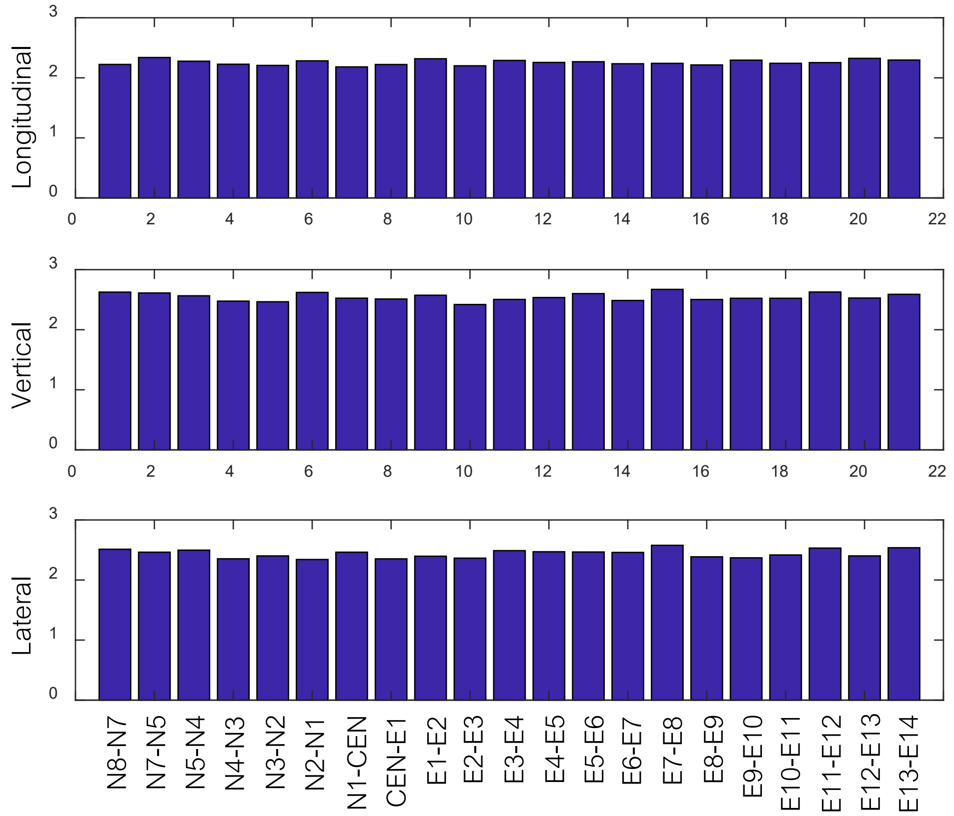


Figure 5 Wz values of EMU-A1 on Sukhumvit line.

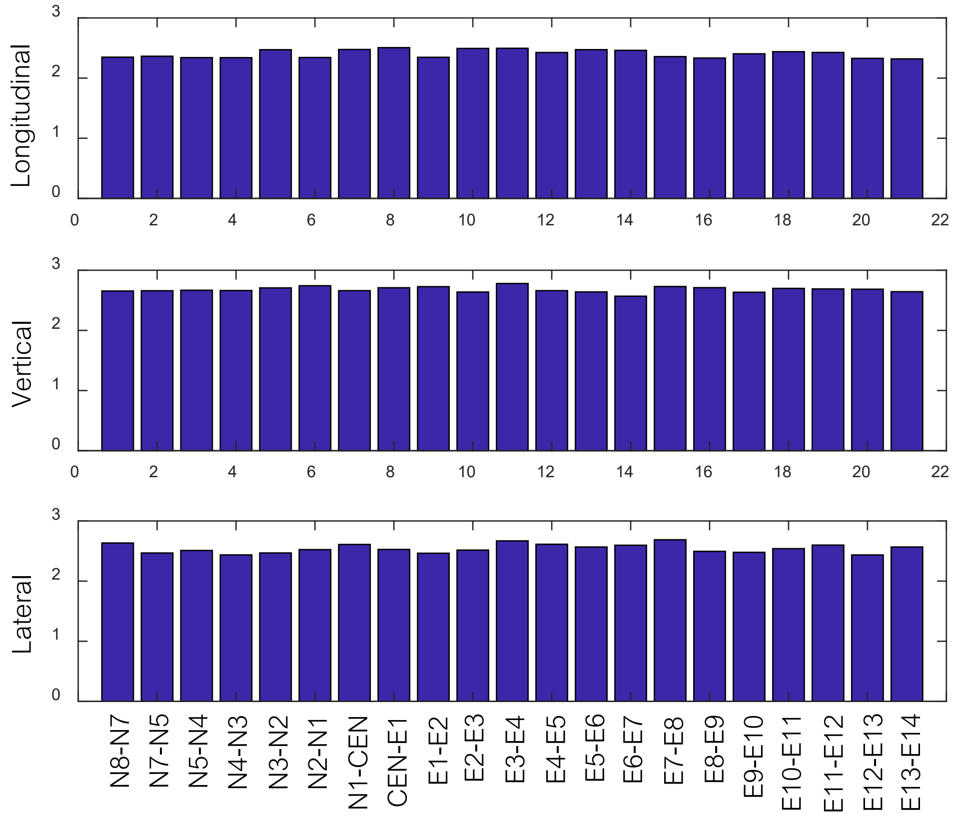


Figure 6 Wz values of EMU-B1 on Sukhumvit line.

ค่า Wz ของ EMU-A1 ในแนวตามยาว แนวดิ่ง และ แนวขวางมีค่าเฉลี่ยที่ 2.2567 2.5475 และ 2.4408 ตามลำดับ ทำให้มีคุณภาพในการโดยสารอยู่ในระดับดี (Good) ตามตารางที่ 1 แต่ในแนวดิ่งมีการสั่นสะเทือนในระดับที่ชัดเจนแต่ไม่แย่นัก (Pronounced but not unpleasant) ในขณะที่ค่า Wz ของ EMU-B1 ในแนวตามยาว แนวดิ่ง และ แนวขวางมีค่าเฉลี่ยที่ 2.4246 2.6798 และ 2.5430 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าของ EMU-A1 ในทุกแนว แต่โดยรวมยังคงมีคุณภาพในการโดยสารในระดับดีตามตารางที่ 1 แต่ในแนวดิ่งและแนวขวางมีการสั่นสะเทือนในระดับที่ชัดเจนแต่ไม่แย่นัก รูปที่ 7 แสดงร้อยละของความแตกต่างของค่า Wz ของ EMU-B1 ที่มากกว่า EMU-A1 เทียบกับค่า Wz ของ EMU-A1 ในทุกช่วงสถานี สังเกตได้ว่าโดยทั่วไปคุณภาพในการโดยสารของ EMU-A1 ดีกว่า EMU-B1 ในทุกช่วงแต่มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง N7-N5 (สะพานควาย-อารีย์) E12-E13 (อุดมสุข-บางนา) และ E13-E14 (บางนา-แบริ่ง) และมีค่าต่างกันมากในช่วง CEN-E1 (สยาม-ชิดลม) E2-E3 (เพลินจิต-นานา) และ E3-E4 (นานา-อโศก) โดย EMU-A1 มีค่าเฉลี่ยของคุณภาพในการโดยสารที่ดีกว่า EMU-B1 ในแนวตามยาว แนวดิ่ง และแนวขวางที่ร้อยละ 6.60 5.25 และ 4.21 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่า Wz ของทุกช่วงสถานีและทุกแนวการเคลื่อนที่มีค่าสูงสุดที่ 2.7803 ซึ่งเป็นค่าในแนวดิ่งของ EMU-B1 ในช่วง E3-E4 (นานา-อโศก) ซึ่งยังคงมีค่าในเกณฑ์ปกติของการเดินรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

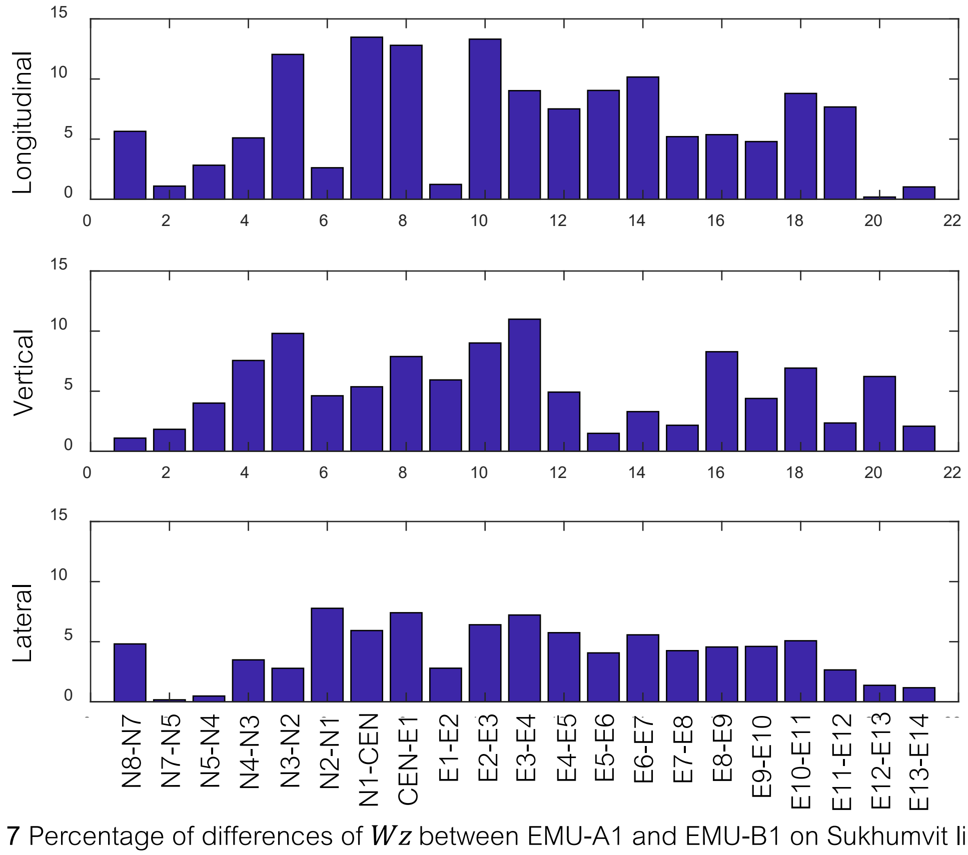


Figure 7 Percentage of differences of Wz between EMU-A1 and EMU-B1 on Sukhumvit line.

สรุป

การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพในการโดยสารระหว่างรถไฟฟ้า EMU-A1 และ EMU-B1 แสดงให้เห็นว่ารถไฟฟ้าทั้งสองขบวนมีคุณภาพในการโดยสารที่แตกต่างกัน ผลการคำนวณจากค่าความเร่งในแนวยาว แนวดิ่ง และแนวขวาง แสดงให้เห็นว่ารถไฟฟ้าทั้งสองขบวนมีคุณภาพในการโดยสารในเกณฑ์ปกติ โดยรถไฟฟ้า EMU-A1 มีคุณภาพในการโดยสารที่ดีกว่ารถไฟฟ้า EMU-B1 บนเส้นทางสายสุขุมวิทในแนวตามยาว แนวดิ่ง และแนว

ขวาง โดยเฉลี่ยที่ร้อยละ 6.60 5.25 และ 4.21 ตามลำดับ การตรวจวัดค่าคุณภาพในการโดยสารเป็นประจำจะช่วยให้ผู้ให้บริการเดินรถทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของขบวนรถไฟฟ้าและทางวิ่งได้ และสามารถใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงขบวนรถไฟฟ้าหรือทางวิ่งได้เมื่อค่า Wz มีค่าสูงกว่าปกติ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศูนย์วิศวกรรมระบบรางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพจำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งบนขบวนรถไฟฟ้าบีทีเอส

เอกสารอ้างอิง

บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพจำกัด (มหาชน). ม.ป.ป. **BTS E-Library** (Online). https://www.bts.co.th/library /system.html, 1 กันยายน 2562.

โอเคเนชั่น. 2553. **พาไปนั่งรถไฟฟ้าบีทีเอส** (Online). http://oknation.nationtv.tv/blog/mrtaweesak/2010/12/16/entry-1/comment, 1 กันยายน 2562.

Andersson E., M. Berg and S. Stichel. 2014. **Rail Vehicle Dynamics.** KTH Railway Group , Sweden.

การออกแบบและพัฒนาเครื่องล้างเหง้ามันสำปะหลัง
DESIGN AND DEVELOPMENT OF CASSAVA ROOT WASHING MACHINE

ประสิทธิชัย มะลอย[1*], ธีรพงศ์ ผลโพธิ์[1]

PrasittHichai Maloy[1*] Teerapong Pholpo[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบ สร้างและพัฒนา เครื่องล้างเหง้ามัน โดยเครื่องประกอบด้วย 5 ส่วนที่สำคัญ คือ 1.ชุดโครงสร้างของเครื่อง 2.ชุดตระแกรงทรงกระบอก 3.ชุดส่งกำลัง 4.ชุดปั๊ม หัวฉีด ถาดรองน้ำ และถาดรวมน้ำ 5.ช่องป้อนและช่องออกของเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งมีหลักการทำงานโดยอาศัยมอเตอร์ต้นกำลัง ขนาด ½ แรงม้า 3 เฟส ซึ่งส่งกำลังขับกับเกียร์ทดที่มีอัตราทดเท่ากับ 60:1 และส่งกำลังผ่านเพลา ซึ่งมีล้อสำหรับขับชุดตระแกรงทรงกระบอกติดอยู่ ภายในตระแกรงทรงกระบอก (Drum) จะมีท่อน้ำ ประกอบด้วยชุดหัวฉีดแรงดันสูง เพื่อฉีดชะล้างทำความสะอาด ทดสอบที่ความเร็วรอบ 15, 20 และ 25 รอบต่อนาที (rpm) และมุมเอียงของตระแกรงทรงบอกที่ระดับ 3, 4 และ 5 องศา โดยมีการฉีดน้ำชะล้างร่วมด้วยที่แรงดันคงที่ 5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2) ผลการทดสอบพบว่าความเร็วรอบที่ดีที่สุดที่ 25 รอบต่อนาที (rpm) และมุมเอียงที่ดีที่สุดที่ 5 องศา มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดอยู่ที่ 87.33 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถล้างเหง้ามันสำปะหลังได้ 350 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) มีอัตราการใช้น้ำ 20 ลิตรเฉลี่ยต่อครั้ง และมีอัตราการใช้ไฟรวม 1.12 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (kW/hr) คิดเป็น 4.40 บาทต่อชั่วโมง

ABSTRACT

This research aims to design construct and develop of cassava root washing machine. Using engineering knowledge to wash a cassava root before entering biomass pelletizing process. The machine has the following key components are: 1) the structure of machine, 2) the grating cylinder (drum), 3) Transmission system, 4) Pump nozzle and water tray, and 5) Feed tray and out tray cassava root. The machine was using a power motor ½ hp 3-phase which connected with gearbox (60:1), to drives through the shaft. There is wheel located at the shaft. Inside the grating cylinder (drum), there is a pipe consisting of a set of high-pressure nozzles. Machine operation test used the speed of the drum at 15, 20 and 25 rpm at the angle of the drum 3, 4 and 5 degrees respectively. There are water spraying with constant pressure at 5 kg/cm^2. The result showed that the best is 25 rpm at 5-degree, cleaning efficiency is 87.33 percent, the capacity is 350 kg/hr, water consumption rate is 20 lite per time and power consumption rate total is 1.12 kW hr^{-1} (4.40 baht per hour).

Key words: Cassava root, Washing machine

* Corresponding author; e-mail address: benwatoye_80@hotmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

คำนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากเป็นพืชที่ปลูกง่ายทนทาน ต่อสภาพดินฟ้าอากาศที่แปรปรวน และสามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำจากแนวโน้มสถานการณ์ของมันสำปะหลัง ปี 2560 ของประเทศไทยพบว่า มีพื้นที่เพาะปลูก 8.9 ล้านไร่ และมีผลผลิตที่ได้คือ หัวมันสำปะหลัง 30.4 ล้านตัน (สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง, 2560) ซึ่งเกษตรกรจะนำหัวมันสำปะหลังส่งขายให้กับโรงงาน เพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น มันเส้น แป้งมันสำปะหลัง อาหารสัตว์ เป็นต้น โดยประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง อันดับหนึ่งของโลก (สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558) เหง้ามันสำปะหลังเป็นส่วนเหลือทิ้งจากกระบวนการเพาะปลูกและการแปรรูปมันสำปะหลัง มีคุณสมบัติแข็งแรง ไม่แตกหักง่าย การนำเหง้ามันสำปะหลังสดมาย่อยให้มีขนาดเล็ก แล้วนำไปตากแห้งเพื่อลดความชื้น ทำให้มีความสามารถในการลุกติดไฟได้และให้ค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่ากับไม้ฟืน ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเหง้ามันสำปะหลังไปแปรรูป เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลป้อนในระบบเผาไหม้พลังงานความร้อนอันเป็นต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งช่วยลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและเป็นการลดขยะที่เหลือจากการเกษตรและอุตสาหกรรมการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาดก่อน เนื่องจากมันสำปะหลังเป็นพืชที่อยู่ใต้ดิน จึงทำให้หัวและเหง้ามันสำปะหลังที่ขุดขึ้นมาจากไร่ ไม่สะอาด มีเศษดิน เศษทรายปะปนอยู่ หากไม่ทำความสะอาดก่อนนำเข้ากระบวนการแปรรูปจะส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ลดลง เพราะมีวัสดุแปลกปลอมปะปนอยู่ และซิลิก้าในเม็ดทราย จะหลอมละลายในเตาเผาชีวมวลเนื่องจากโดนความร้อนสูง ซึ่งส่งผลให้เตาเผามีประสิทธิภาพลดลงอีกด้วย จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้มีแนวคิดที่จะออกแบบ สร้างและพัฒนาเครื่องล้างเหง้ามันสำปะหลัง เพื่อช่วยในการล้างทำความสะอาดเหง้ามันสำปะหลังให้สะอาดจากสิ่งสกปรก เช่น เศษดิน เศษทราย ที่ติดอยู่ตามเหง้ามันสำปะหลังก่อนนำเข้าสู่กระบวนการแปรรูปอัดเม็ด อันจะทำให้เตาเผามีความเสียหายและการเผาไหม้มีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบ สร้าง พัฒนา ทดสอบความสามารถในการทำงาน และประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของเครื่องล้างเหง้ามันสำปะหลัง

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบเครื่องล้างเหง้ามันสำปะหลัง

เครื่องต้นแบบล้างเหง้ามันสำปะหลังมีส่วนประกอบที่สำคัญ (Figure 1) ดังนี้ 1)ชุดโครงเครื่อง 2)ชุดตะแกรงทรงกระบอก 3) ชุดส่งกำลัง 4) ชุดปั๊ม หัวฉีด ถาดรองน้ำ และถาดรวมน้ำ และ5)ช่องป้อนและช่องออกของเหง้ามันสำปะหลัง มีขั้นตอนการทำงานคือ ป้อนเหง้ามันสำปะหลังลงไปในช่องป้อนเหง้ามันสำปะหลังด้านหัวของตัวเครื่อง มันสำปะหลังจะถูกลำเลียงเข้าไปภายในชุดตะแกรงทรงกระบอก (Drum) ซึ่งภายในตะแกรงทรงกระบอก จะมีท่อน้ำ ประกอบด้วยชุดหัวฉีดแรงดันสูง เพื่อฉีดชะล้างทำความสะอาด ในขณะเดียวกัน ชุดดรัมจะหมุนตลอดกระบวนการ โดยใช้แรงขับเคลื่อนของล้อขับที่ติดกับเพลา จากนั้นเหง้ามันสำปะหลังที่ทำความสะอาดเสร็จแล้วจะลำเลียงมาจนสุดส่วนท้ายของชุดดรัม และเคลื่อนที่ออกจากชุดดรัมโดยผ่านช่องออกด้านท้ายของตัวเครื่อง

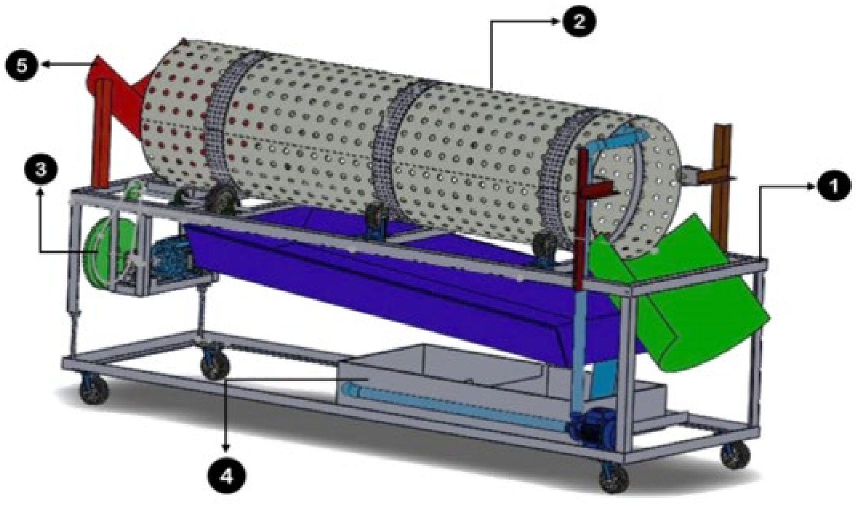


Figure 1 Cassava root washing machine.

ความเร็วรอบและมุมเอียงของตระแกรงทรงกระบอกที่ดีที่สุดในการทำความสะอาดเหง้ามันสำปะหลัง ทำได้ดังนี้

ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ ขนาด ½ แรงม้า (Hp) 3 เฟส นั้นจะใช้อินอินเวอร์เตอร์ (inverter) ปรับความถี่ หามอเตอร์ที่การทดสอบความเร็วที่ 15, 20 และ 25 รอบต่อนาที (rpm) และที่มุมเอียงของตระแกรงทรงกระบอก 3, 4 และ 5 องศา ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการเปิดระบบน้ำ โดยควบคุมความดันให้อยู่คงที่ 5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร(kg/cm^3) แล้วป้อนเหง้ามันสำปะหลังจำนวน 5 กิโลกรัม (kg) เข้าสู่ภายในตระแกรงทรงกระบอก ทำการจับเวลาการทำงานของเครื่องตั้งแต่เริ่มจนสิ้นสุดกระบวนการ โดยจะทำการทดลอง จำนวน 5 ครั้ง ในแต่ละความเร็วรอบและมุมเอียง ที่ทำการแยกสิ่งสกปรกออกมากับน้ำที่ผ่านการล้างเหง้ามันสำปะหลัง โดยใช้ผ้าขาวบางกรองสิ่งสกปรก แล้วนำสิ่งสกปรกไปอบด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียล (˚C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (hr) จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเป็นการปรับระดับความชื้นให้อยู่ในสภาวะอากาศปกติ แล้วทำการชั่งน้ำหนัก นำสิ่งสกปรกที่ผ่านการอบ มาเข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 10 นาที ผ่านรูตะแกรงขนาด 30, 50 และ 80 mesh ตามลำดับ เพื่อทำการแยกทรายออกจากเศษสิ่งสกปรก ทำการชั่งน้ำหนักของทรายที่ออกมาจากสิ่งสกปรก เก็บข้อมูลและทำการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

การวิเคราะห์ผลมีวิธีดังนี้

จากการทดลอง เพื่อหาความเร็วรอบและมุมเอียงของชุดตระแกรงทรงกระบอกที่ดีที่สุด โดยวิเคราะห์ผลจากน้ำหนักทรายที่ได้จากการกระบวนการชะล้าง จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ของความสะอาดของเหง้ามันสำปะหลัง โดยมีขั้นตอนการสร้างเกณฑ์ความสะอาดความเร็วรอบและมุมเอียงของชุดตระแกรงทรงกระบอกที่ดีที่สุด โดยวิเคราะห์ผลจากน้ำหนักทรายที่ได้จากการกระบวนการชะล้าง จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ของความสะอาดของเหง้ามันสำปะหลัง โดยมีขั้นตอนการสร้างเกณฑ์ความสะอาดมีวิธีดังนี้

ทำการเตรียมเหง้ามันสำปะหลังจำนวน 5 กิโลกรัม (kg) ใส่ในถาดเพื่อทำความสะอาด จากนั้นเติมน้ำลงในถาดและใช้แปรงขนอ่อนขัดทำความสะอาดจนไม่มีทรายติดอยู่กรองสิ่งสกปรกจากน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาดเหง้ามันสำปะหลังด้วยผ้าขาวบาง เพื่อแยกสิ่งสกปรกนำสิ่งสกปรกที่ได้มาชั่งน้ำหนัก และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส (เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) นำสิ่งสกปรกที่อบแล้วมาชั่งน้ำหนัก และเข้าเครื่องเขย่า เพื่อทำการแยกทรายชั่งน้ำหนักทรายที่ได้ทำซ้ำ จำนวน 5 ครั้ง แล้วจดบันทึก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความสามารถในการทำความสะอาดของการล้างเหง้ามันสำปะหลัง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA) พบว่า ที่ความเร็วรอบ 15 และ 20 รอบต่อนาที (rpm) ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในความสะอาด ในขณะที่ความเร็วรอบ 25 รอบต่อนาที (rpm) มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพความสะอาด และพบว่าที่มุมเอียง 3, 4 และ 5 องศา ตามลำดับ มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพความสะอาด โดยที่ความเร็วรอบ 15 รอบต่อนาที (rpm) มุมเอียง 3, 4 และ 5 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความสะอาดเท่ากับ 26.72, 46.46 และ 40.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที (rpm) มุมเอียง 3, 4 และ 5 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความสะอาดเท่ากับ 17.33, 42.39 และ 64.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเร็วรอบ 25 รอบต่อนาที (rpm) มุมเอียง 3, 4 และ 5 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความสะอาดเท่ากับ 16.67, 49.83 และ 87.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Figure 2)

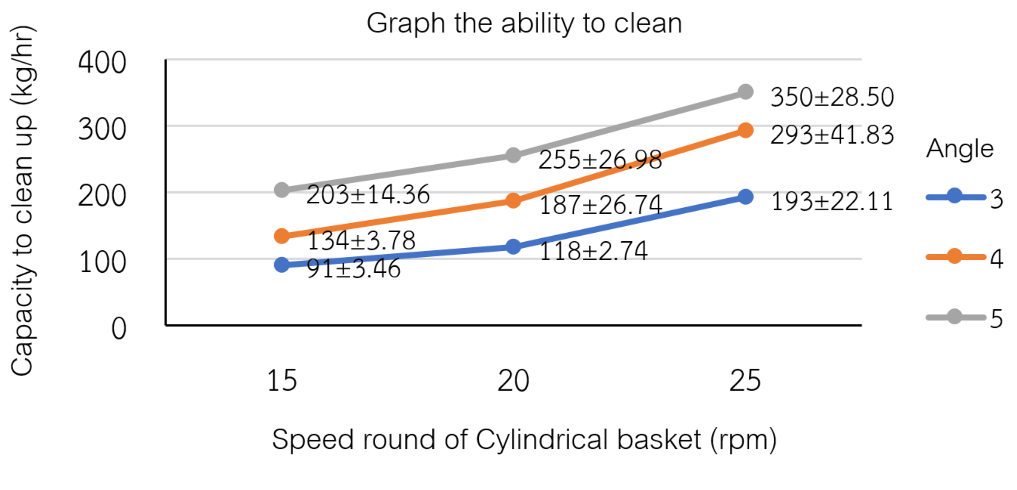


Figure 2 The graph shows the relationship between Speed round of Cylindrical basket (rpm) and capacity to clean up (kg/hr).

ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของการล้างเหง้ามันสำปะหลัง

จากผลการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA) พบว่า ที่ความเร็วรอบ 15 และ 20 รอบต่อนาที (rpm) ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในความสะอาด ในขณะที่ความเร็วรอบ 25 รอบต่อนาที (rpm) มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพความสะอาด และพบว่าที่มุมเอียง 3, 4 และ 5 องศา ตามลำดับ

มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพความสะอาด โดยที่ความเร็วรอบ 15 รอบต่อนาที (rpm) มุมเอียง 3, 4 และ 5 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความสะอาดเท่ากับ 26.72, 46.46 และ 40.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที (rpm) มุมเอียง 3, 4 และ 5 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความสะอาดเท่ากับ 17.33, 42.39 และ 64.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเร็วรอบ 25 รอบต่อนาที (rpm) มุมเอียง 3, 4 และ 5 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความสะอาดเท่ากับ 16.67, 49.83 และ 87.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าที่ความเร็ว 15 รอบต่อนาที (rpm) มุมเอียง 5 องศา มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดน้อยกว่ามุม 4 องศา สาเหตุเกิดจากแท่นมอเตอร์ต้นกำลังเกิดการเคลื่อนที่ทำให้สายพานส่งกำลังหย่อน ทำให้การส่งกำลังไม่เต็มประสิทธิภาพ จึงทำให้ประสิทธิภาพก็ลดลงตามไปด้วย (Figure 3)

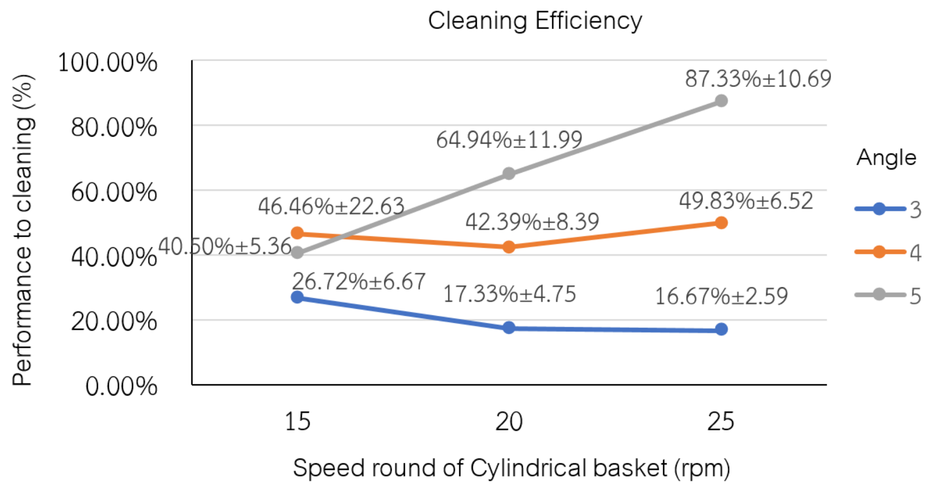


Figure 3 The graph shows the relationship between Speed round of Cylindrical basket (rpm) and Performance to cleaning (%).

สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลองเครื่องล้างเหง้ามันสำปะหลัง พบว่า ที่สภาวะการทำงานที่ดีที่สุดในการล้างเหง้ามันสำปะหลัง ที่ความเร็วรอบ 25 รอบต่อนาที (rpm) มุมเอียง 5 องศา มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาด 87.33 เปอร์เซ็นต์ สามารถล้างเหง้ามันสำปะหลังได้ 350 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) โดยเครื่องล้างเหง้ามันสำปะหลังมีอัตราการใช้น้ำเฉลี่ย 20 ลิตรต่อครั้งการทดลอง และอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมอยู่ที่ 1.12 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (kW/hr) คิดเป็นค่าไฟฟ้า 4.4 บาทต่อชั่วโมง (Baht/hr)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรวิชาวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ใช้สถานที่ และอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆในการทำวิจัย

บริษัท พิลเลตโปร จำกัด ซึ่งเป็นผู้จุดประกายแนวคิดในการสร้างเครื่องล้างเหง้ามันสำปะหลัง และจัดหาเหง้ามันสำปะหลังซึ่งเป็นวัสดุในการทดลองและพัฒนาโครงงานนี้

คุณวัชเรศร เริงสมุทร เจ้าของไร่มันสำปะหลัง จังหวัดชลบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เหง้ามันสำปะหลัง เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของเครื่อง

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2547. **ระบบปรับอากาศ ปั๊มน้ำ และพัดลม** (Online). https://ienergyguru.com/2015/09/pump/, 16 พฤศจิกายน 2561

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2558. **เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่นและเทคโนโลยีไพโลไลซิส** (Online). http://e-lib.dede.go.th/mm-data/BibA11158.pdf, 29 สิงหาคม 2561

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2558. **บทปฏิบัติการ มันสำปะหลัง** (Online). http://www.natres.psu.ac.th/Department/PlantScience/default.htm, 27 สิงหาคม 2561

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2559. **ข้อมูลพรรณไม้: มันสำปะหลัง** (Online). http://www.natres.psu.ac.th, 27 สิงหาคม 2561

วารสาร Engineering Today. 2547. **เหง้ามันสำปะหลัง ชีวมวลทางเลือกผลิตกระแสไฟฟ้า** (Online). http://www.technologymedia.co.th, 21 สิงหาคม 2561

ศูนย์สารสนเทศเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจเกษตร. 2558. **แหล่งปลูกมันสำปะหลังในประเทศไทย** (Online). https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=18045, 21 สิงหาคม 2561

สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย. 2560. **สรุปผลการสำรวจภาวะการณ์ผลิตและการค้ามันสำปะหลัง ฤดูการผลิตปี 2560/61** (Online). http://thaitapioca.org, 12 กันยายน 2561

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2558. **ความสำคัญของมันสำปะหลัง** (Online). https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=17872, 21 สิงหาคม 2561

Manufacture Overhaul Rapid and Optimal Co., Ltd. 2558. **อัตราทดเฟืองและตัวอย่างสูตรคำนวณหาการส่งกำลังด้วยสายพาน** (Online). http://www.moro.co.th, 13 กันยายน 2561

Mpoko Mokanga. 1997. **Post-harvest Operations (**Online). http://www.fastonline.org, 28 สิงหาคม 2561

Comparative Analysis for Thai-Lao Friendship Bridge No.1 Under SRT U20 Train and Full Road Traffic Load.

Bounvilay Mixaykham[1,2*], Prapot Kuntong[1], Wichai Siwakosit[1]

ABSTRACT

This paper presents a comparative study for Thai-Lao friendship bridge No.1 Under SRT U20 train and full road traffic load. The purpose of this study is to find out whether the bridge could withstand the loads within allowable flexural stress value using finite element model. The results indicate that all compressive flexural stress values are well within the allowable stress used in the design for this bridge. SRT U20 load has produced larger stress values than those of the full traffic road load.

Key words: Thai-Lao friendship bridge, finite element

[*]Corresponding author; email address: meemixay@gmail.com

[1] Kasetsart University Rail Engineering Center, Faculty of Engineering, Kasetsart University

[2]Lao Railways, Thanaleng, Vientiane, Lao PDR

INTRODUCTION

The Mekong river bridge project have been a joint project between the governments of Australia, Thailand and Lao PDR. The Mittraphab bridge or friendship bridge No. 1 (Figure 1) was built across the Mekong river between Nongkhai in Thailand and Thanaleng near Vientiane in Laos PDR. The bridge contributes significantly to the economic and social development of the region and to strengthen the bilateral relationship between Thailand and Lao PDR [Wikipedia]. This 1,174 meters with 8 piers continuous frame bridge was designed to carry two lanes of road traffic with provision for a single meter gauge railway track of the state railway of Thailand (SRT). The project began construction in October 1991 and opened to road traffic in April 1994, while the railway track on the bridge was completed and a passenger train service started operation in May 2009. Freight train operation started in August 2019 after 25 Years of service. The 15 ton axle load is mutually agreed for railway operation across the bridge, however this limiting axle load value may prohibit modern SRT locomotives with axle load of 16 ton and 20 ton for freight operation on the bridge. This study analyses deflection behaviour of the existing bridge structure by finite element method for load capacity evaluation of the bridge. This paper is intended to study the effects of the SRT locomotive with 20 ton axle load in comparison with the full road traffic load permitted on the bridge for better understanding of the proper axle load on the bridge.

Figure 1 Thai-Lao friendship bridge No.1.   Source: [Wikipedia]

A review of railway bridge design and a book on pre-stressed concrete bridge design can be found in reference No. 2 and reference No. 3, while the information related to the bridge in this study is from reference No. 4 and reference No.5.

MATERIALS AND METHODS

Finite Element Analysis (FEA) is a method used to study a selected midspan section between pier No.9 and pier No.10 as the representation of the bridge structure as shown in Figure 2. The model by FEA software (MSC PATRAN-NASTRAN^{TM} 2018) with 3D solid element has the total element of 188,760 elements and total node of 233,155 nodes whereby the tendon pre-stress is created by total compressive load into the selected cross section following the as built drawing and design report [Lao Railway].

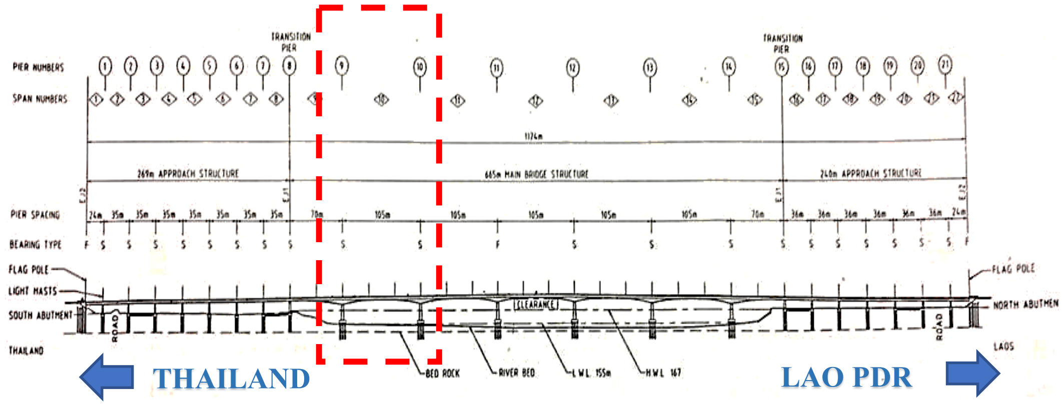


Figure 2 Selected midspan section for the analysis between pier No.9 and pier No.10.

Source: [Lao Railway]

FEA model verification is carried out by comparisons of strain values under static load test of the bridge from reference No.4 and strain values from the FEA model at the selected midspan section. The locations of strain measurements is shown in Figure 3. Figure 4 shows the FEA model.

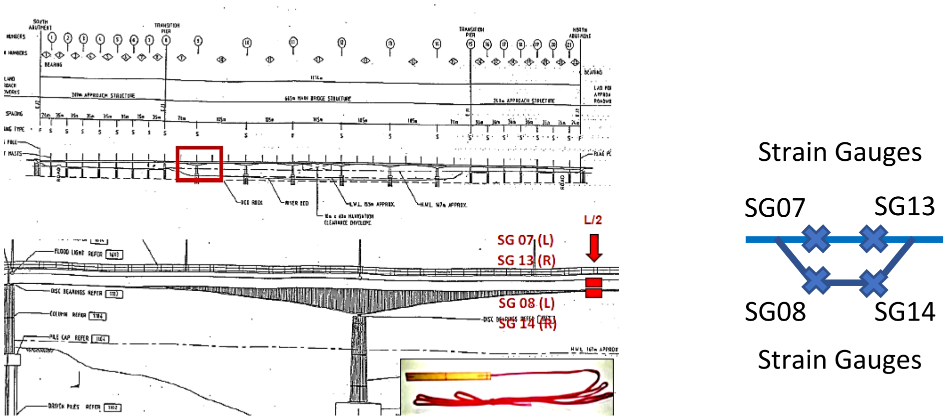


Figure 3 Strain gauge measurement positions at the selected midspan section.

Source: [Lao Railway]

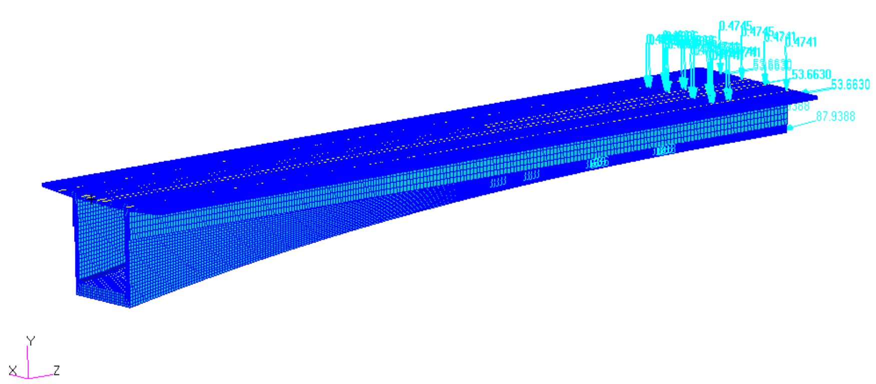


Figure 4 FEA model of the selected section.

The property of concrete for FEA model is shown in table 1 [Lao Railway], where the road traffic and SRT U20 loads are shown in figure 4. Bridge loading considered in structural analysis and load-carrying capacity evaluation of the bridge structure consists of the full road traffic trailer (22 wheel truck) with maximum gross load of 53 tons in comparison with SRT U20 load of 120 ton locomotive with a 64 ton freight car at the bridge span.

Table 1 Concrete property for the FEA model.

Ultimate Compressive Strength (MPa)	45
Modulus of Elasticity (MPa)	33,540
Poisson’s Ratio	0.25

Source:[5]

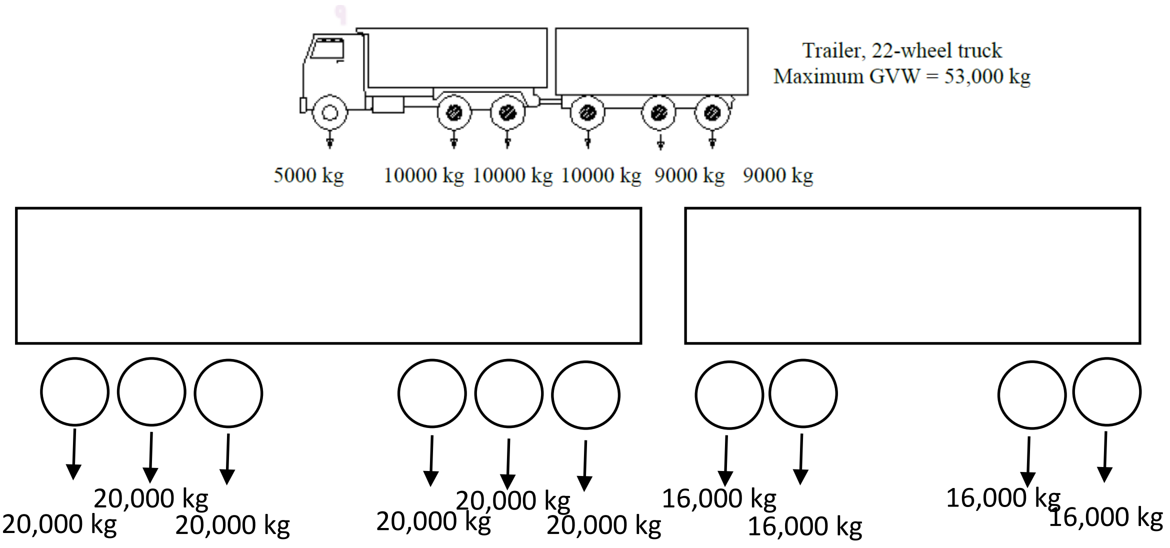


Figure 4 Vehicle traffic loads on the bridge Source: Adapted from [Lao Railway]

RESULTS AND DISCUSSIONS

Table 2 shows strain values from strain gauge measurement [Lao Railway] versus strain values from FEA model in this study with similar load condition. The results from the FEA model is agreeable with experimental results. Table 3 shows flexural pre-stressed values at the selected midspan section of the bridge.

Table 2 Micro strain values.

Strain gage position		L/2		L/2 (Δ)		Difference (%)
		Test report	FEA	Test report	FEA	
Top	SG 07	-6	-10	30	28	6.67
	SG 13	-6	-10			
Bottom	SG 08	31	18			
	SG 14	24	18			

Table 3 Flexural pre-stressed values at mid span section of the bridge.

Mid Span Section	Compressive Stress Value
Top	5 MPa
Bottom	14 MPa

Source: [Lao Railway]

Figure 5 and figure 6 shows flexural stress values from a case of full traffic road load and a case of SRT U20 load respectively. The compressive flexural stresses value from the full road load case in combination with pre-stressed values on the mid span section are 6.98 MPa on the top of the section and 12.02 MPa on the bottom of the section. For SRT U20 case they are 7 MPa for the top section and 11.5 MPa for the bottom section. From allowable compressive stress value of 18 MPa in reference 4, these values are well within the allowable limit for this bridge.

CONCLUSION

This study shows that the Thai-Lao friendship bridge No.1 should be able to withstand both SRT U20 and full road traffic load according to finite element model simulation, The model is agreeably verified with experimental results.

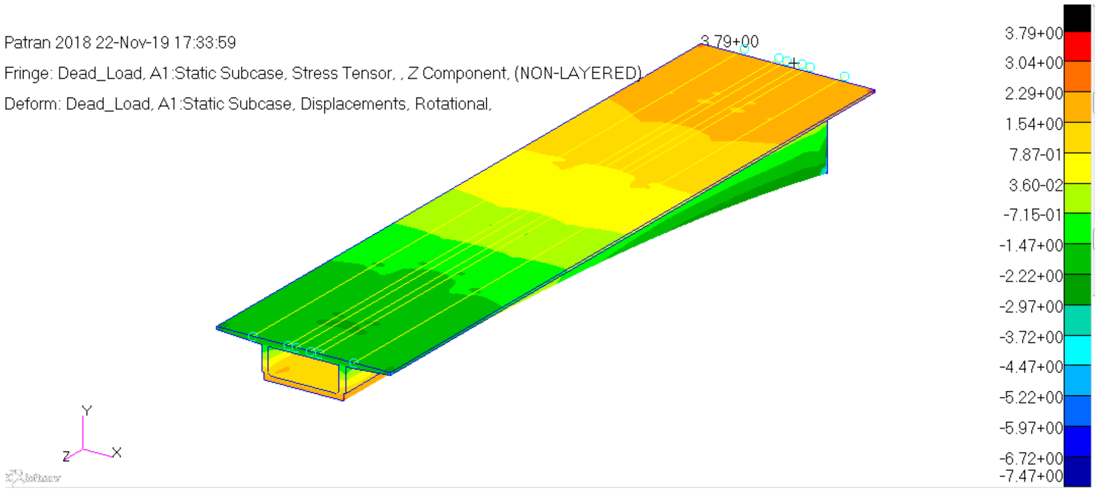


Figure 5 Flexural stress values from full road traffic load.

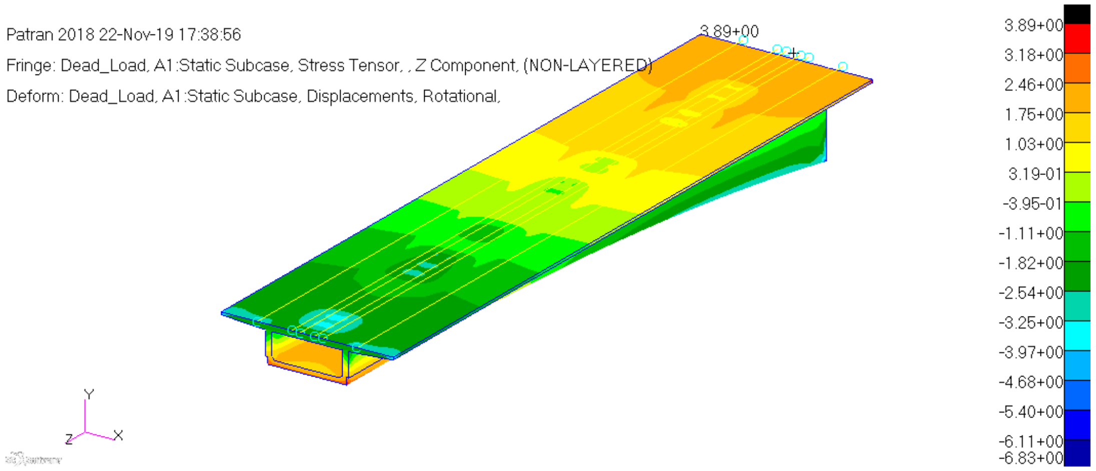


Figure 6 Flexural stress values from SRT U20 load.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank Lao railways and State railway of Thailand for technical information used in this study.

REFERENCES

Hayward, A.G.C. 2017. “The construction of railway bridges then and now”, **The International Journal for the History of Engineering & Technology** 84:1, 59-87.

Hewson, N.R. 2006. **Prestressed concrete bridges: design and construction**, Thomas Telford Publishing

Lao Railway, 2012. **Bridge Inspection and Evaluation of Thai Friendship Bridge-Lao (Nongkhai-Vientiane).**

Lao Railway, 1994. **Design report: final issue**,

Wikipedia. 2019. **List of Crossings of the Mekong River** (Online). https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_crossings_of_the_Mekong_River, December 10, 2019

การวิเคราะห์และออกแบบระบบระบายอากาศในห้องเครื่องทำความเย็น

กรณีศึกษา โรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูปแช่แข็ง

Analysis and Design of Ventilation System in Refrigerating Machinery Room Case Study Frozen Food Factory

ยุพาวรรณ อารีช่วย[1,*] และ อภิชาต แจ้งบำรุง[2]

Yupawan Areechuay[1,*] and Apichart Chaengbamrung[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ระบบระบายอากาศในห้องเครื่องทำความเย็นห้อง 1 ที่ได้มีการออกแบบและปรับปรุงระบบระบายอากาศเรียบร้อยแล้วว่ามีความสอดคล้องตามกฎหมาย และมาตรฐานการระบายอากาศในสภาวะปกติและสภาวะฉุกเฉิน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบระบายอากาศในห้องเครื่องทำความเย็นห้อง 2 เมื่อวิเคราะห์การออกแบบระบบระบายอากาศ พบว่าห้องครื่องทำความเย็นห้อง 1 มีการออกแบบระบบระบายอากาศที่มีอัตราการระบายอากาศเกินกว่ากฎหมาย และมาตรฐานการระบายอากาศที่กำหนดในสภาวะปกติ แต่การออกแบบการระบายอากาศในสภาวะฉุกเฉินยังต่ำกว่ามาตรฐาน และได้ทำการออกแบบระบบระบายอากาศในห้องเครื่องทำความเย็น 2 ที่อัตราการระบายอากาศ 6,400 ลบ.ฟุตต่อนาที เพื่อให้สามารถรองรับสภาวะฉุกเฉินและระบายก๊าซแอมโมเนียออกสู่นอกห้องได้อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดก๊าซแอมโมเนียรั่วไหลภายในห้อง

ABSTRACT

This research aims to analyze the ventilation system in the Refrigerating Machinery Room 1. It has designed and improved to comply with law and ventilation standards in both normal and emergency conditions. This is used as a guideline for designing ventilation systems in the refrigerating machinery room 2. After analyzing the design of the ventilation system, it found that the refrigerating machinery room one has been designed the system rate over the law and standard in normal condition. However, the design of the ventilation system is still below for the standard in an emergency condition. The ventilation system in refrigerating machinery room two was designed with the ventilation rate at 6,400 cubic feet per minute. This is for handling the emergency condition, and quickly release ammonia gas outside the room when ammonia gas leaks inside the room.

Key Words: Ventilation, Refrigerating Machinery Room

*Corresponding author; email address: **yupawan.a@ku.ac.th**

คำนำ

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพ 10900

[1]Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพ 10900

[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

สถานประกอบกิจการผลิตอาหารสำเร็จรูปแช่แข็ง มีการนำระบบเครื่องทำความเย็นมาเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตอาหาร มีการใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น สถานประกอบกิจการที่ทำการศึกษาครั้งนี้มีห้องเครื่องทำความเย็นจำนวน 2 ห้อง คือ ห้องเครื่องทำความเย็น 1 ทำหน้าที่ทำความเย็นจ่ายให้กับเครื่องแช่แข็งเร็ว (Individual Quick Frozen) ไลน์การผลิต 1 และห้องเครื่องทำความเย็น 2 ทำหน้าที่ทำความเย็นจ่ายให้กับเครื่องแช่แข็งเร็วไลน์การผลิต 2 และ 3 ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าแอมโมเนียที่ใช้จัดว่าเป็นก๊าซพิษตัวหนึ่ง ซึ่งสามารถทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานจนถึงขั้นเสียชีวิตได้ เมื่อเกิดอุบัติเหตุทำให้แอมโมเนียเกิดการรั่วไหลแล้วจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของพนักงาน ชุมชนโดยรอบ หรือทำให้เกิดการเสียชีวิตทันทีกรณีที่มีแอมโมเนียรั่วไหลที่มีความเข้มข้นสูง ดังตัวอย่าง วันที่ 25 มีนาคม 2548 โรงงานผลิตอาหารทะเลแช่แข็ง สาเหตุเกิดจากความผิดพลาดในระบบจ่ายแอมโมเนียหรือเกิดการขยายตัวของแอมโมเนียทำให้หน้าแปลนวาล์วจ่ายโก่งงอแอมโมเนียจึงรั่วไหลออกมา ทำให้มีผู้ได้รับบาดเจ็บ 75 ราย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) และที่ผ่านมาสถานประกอบกิจการได้เคยประสบเหตุ เช่น การรั่วไหลแอมโมเนียขณะเติมแอมโมเนียเข้าระบบ การระบายไอแอมโมเนียผ่านน้ำปริมาณมากทำให้เกิดค่าความเข้มข้นแอมโมเนียสูง และอุปกรณ์ในห้องเครื่องทำความเย็นชำรุดทำให้แอมโมเนียรั่วไหลออกจากระบบภายในห้อง ซึ่งพบว่าผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องเข้าไปปฏิบัติงาน หรือตรวจสอบอุปกรณ์ ท่อ วาล์วหรือจุดที่เกิดปัญหาทำให้แอมโมเนียเกิดการรั่วไหลภายใต้สภาวะที่ยังมีแอมโมเนียฟุ้งกระจายอยู่ภายในห้อง เพื่อควบคุมสถานะการณ์การแพร่กระจาย หรือลดผลกระทบต่อกระบวนการผลิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการศึกษากฎหมาย และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบระบายอากาศในห้องเครื่องทำความเย็น เช่น กฎกระทรวง กำหนดมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นในโรงงาน พ.ศ. 2554 คู่มือมาตรฐานวิธีการตรวจสอบโรงงาน ห้องเย็น (ประเภทหรือชนิดโรงงานลำดับที่ 92) กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2549 และรายงานการตรวจสอบความปลอดภัยระบบทำความเย็น ของสำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม มาตรฐานระบบปรับอากาศและระบายอากาศ วิศวกรรมแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) 2559 และมาตรฐาน ANSI/IIAR (American National Standard Institute/International Institute of Ammonia Refrigeration) เพื่อทำการวิเคราะห์การออกแบบระบบระบายอากาศภายในห้องเครื่องทำความเย็น 1 ภายหลังจากการปรับปรุงระบบระบายอากาศแล้ว และใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบระบายอากาศห้องเครื่องทำความความเย็น 2 ให้สอดคล้องตามกฎหมายและมาตรฐานที่กำหนด เพื่อรองรับกับสภาวะเหตุฉุกเฉินสารแอมโมเนียรั่วไหล

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาครั้งนี้เพื่อการวิเคราะห์และออกแบบระบบระบายอากาศของห้องเครื่องทำความเย็นโดยคำนวณจากอัตราการการระบายอากาศภายในให้สอดคล้องตามกฎหมาย และมาตรฐานที่กำหนดเพื่อสามารถรองรับสภาวะฉุกเฉินแอมโมเนียรั่วไหลภายในห้องเครื่องทำความเย็น ซึ่งมีวิธีการดำเนินการดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
   1.1 ศึกษากฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการระบายอากาศห้องเครื่องทำความเย็น

จากผลการศึกษากฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับความต้องการอัตราการระบายอากาศภายในห้องเครื่องทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียตามกฎหมายและมาตรฐาน ได้กำหนดอัตราการระบายอากาศสภาวะที่ปกติและสภาวะฉุกเฉิน (Table 1)

Table 1 Minimum ventilation rates in refrigeration machinery room.

Law and ventilation standards	Ventilation (Air flow rate)	
	Normal	Emergency
1. Ministerial Regulations on Safety Measures Refrigeration Systems Using Ammonia as Refrigerants in Factory 2011.	3 ACH	-
2. Air Conditioning and Ventilation Standard by The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage.	2.5 L/s	$Q = 70\sqrt{G}$
3. American National Standard Institute /International Institute of Ammonia Refrigeration (ANSI/IIAR).	20 ACH	30 ACH

Q = Air flow rate L/s   G = mass of the refrigerant filling quantity in kg

1.2 ศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของสารทำความเย็น และความเป็นอันตรายของก๊าซแอมโมเนีย

ก๊าซแอมโมเนีย เป็นสารเคมีที่ถูกจัดจำแนกความอันตรายไว้เป็นประเภท (Class) 2.3 ก๊าซพิษและกัดกร่อน และยังจัดเป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535

คุณสมบัติทางกายภาพของแอมโมเนีย (สุภาณี,2553) สามารถดำรงอยู่ได้ทั้งในสภาพของก๊าซและก๊าซเหลวภายใต้ความดัน แอมโมเนียมีน้ำหนักเบากว่าอากาศ สามารถละลายน้ำได้ดี ก๊าซแอมโมเนียจะรวมตัวกับความชื้นในอากาศ ทำให้เกิดเป็นหมอกควันสีขาวของแอมโมเนียที่เบาและหนักกว่าอากาศอยู่ปะปนกัน โดยทั่วไปจะมีการใช้สารทำความเย็น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม,2549) ด้วยกัน 2 ชนิดคือ สารทำความเย็นที่เป็นสารฟรีออน และสารแอมโมเนีย ระบบทำความเย็นที่ใช้สารแอมโมเนียซึ่งเป็นสารพิษ จะเป็นอันตรายร้ายแรงกว่าระบบทำความเย็นที่ใช้สาร ฟรีออน โดยเฉพาะปัญหาการรั่วไหลของสารแอมโมเนีย ซึ่งหากมีการรั่วไหลทันทีที่มีความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะเริ่มได้กลิ่น และเริ่มเกิดการระคายเคืองต่อระบบหายใจที่ความเข้มข้ม 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และหากมีการสัมผัสโดยตรงกับผิวหนังหรือร่างกายจะทำให้เกิดการไหม้ของผิวหนังอย่างรุนแรงและอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ ตามมาตรฐานสมาคมวิศวกรการทำความร้อน การทำความเย็นและการปรับอากาศแห่งสหรัฐอเมริกา (ASHRAE) จำแนกสารทำความเย็นตามความเป็นอันตรายในการใช้ออกเป็น 8 กลุ่ม คือ A1 A2 A2L A3 B1 B2 B2L และ B3 สำหรับกลุ่ม A1 จัดเป็นอันตรายน้อยสุดและกลุ่ม B3 เป็นอันตรายมากที่สุดตามลำดับ โดยสารแอมโมเนีย (R717) จัดอยู่ในกลุ่ม 2BL คือ เป็นสารติดไฟน้อย มีความเป็นพิษมาก

ความเป็นอันตรายของแอมโมเนีย จัดเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูง เป็นอันตรายต่ออวัยวะต่างๆ ของร่างกาย เช่น ดวงตา ผิวหนัง ระบบทางเดินหายใจ การสูดดมแอมโมเนียเข้าไปจะทำให้ระคายเคืองจมูก ลำคอ หากได้รับปริมาณมากๆ จะทำให้หายใจติดขัด เจ็บหน้าอก หลอดลมบีบเกร็ง ปวดบวมได้ การสัมผัสผิวหนังจะทำ

ให้เกิดผื่นแดง ปวด ผิวหนังอักเสบ หากสัมผัสแอมโมเนียในสถานะของเหลวจะทำให้เกิดแผลไหม้จากความเย็นจัดกัดกร่อน(Cold burn) เมื่อกระเด็นเข้าตาอาจตาบอดได้ หากสัมผัสแอมโมเนียในระยะเวลานาน จะทำให้เป็นโรคทางเดินหายใจ

1.3 ศึกษาและวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดแอมโมเนียรั่วไหลในห้องเครื่องทำความเย็น

ตามคู่มือมาตรฐานวิธีการตรวจสอบโรงงานห้องเย็น (ประเภทหรือชนิดโรงงานลำดับที่ 92) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม,2549) ได้กล่าวถึงอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจากการรั่วของสารแอมโมเนียในระบบทำความเย็นส่วนใหญ่เกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1.3.1 การชำรุดของอุปกรณ์เนื่องจากการผุกร่อน และการหมดอายุใช้งานของชิ้นส่วน เช่น ระบบควบคุมแรงดันสูงและแรงดันน้ำมันไม่ทำงานเนื่องจากอุปกรณ์ชำรุด ใช้วัสดุที่ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิต่ำได้

1.3.2 การเกิดแรงดันสูงผิดปกติในระบบ เนื่องจากระบบน้ำหล่อเย็นไม่ทำงาน เดินเครื่องที่แรงดันไอทางสูงเกินไป และอุปกรณ์ควบคุมทางด้านแรงดันสูง (Hi – Pressure Control) ไม่ทำงาน

1.3.3 เกิดจากการขยายตัวของของเหลวในระบบ เนื่องจากติดตั้งวาล์วกันกลับ (Check Valve) ผิดทาง มีสารแอมโมเนียเหลวที่อุณหภูมิต่ำตกค้างระหว่างวาล์วขณะทำการปิดวาล์ว ทำให้สารแอมโมเนียเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำรั่วเข้าชุดคอล์ยทำความเย็น (Evaporator) ขณะหยุดการใช้งาน ไม่ปิดวาล์วจ่ายสารแอมโมเนียขณะหยุดใช้งาน ไม่มีลิ้นควบคุมแรงดันคร่อมเครื่องวัด และไม่มีลิ้นควบคุมแรงดันในระบบท่อของเหลวของระบบเครื่องสูบหมุนเวียน

1.3.4 เกิดความผิดพลาดของผู้ควบคุม เนื่องจากผู้ควบคุมขาดประสบการณ์และการฝึกอบรมที่ถูกต้องไม่เข้าใจถึงการทำงานของระบบและอุปกรณ์ในระบบที่ถูกต้อง ประมาทเลินเล่อ เช่น ประเก็นฝาสูบแตกเนื่องจากขันน็อตฝาสูบไม่แน่นบริเวณคอมเพรสเซอร์ ขันเกลียวข้อต่อวาล์วไม่แน่นเมื่อเติมสารแอมโมเนียเข้าระบบ

2. สำรวจพื้นที่ และศึกษาระบบระบายอากาศที่ติดตั้งภายในห้องเครื่องทำความเย็น 1,2

2.1 ห้องเครื่องทำความเย็น 1 มีขนาดพื้นที่ 50 ตารางเมตร และปริมาตรห้องเท่ากับ 250 ลูกบาศก์เมตร ภายในห้องไม่มีช่องหน้าต่างหรือช่องเปิดใดๆทั้งนั้น มีเพียงประตูเข้าหลักขนาดความกว้าง 1.4 เมตร สูง 2 เมตร และประตูทางออกฉุกเฉินกว้าง 1 เมตร สูง 2 เมตร ภายในห้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องทำความเย็น ได้แก่

คอมเพรสเซอร์ (Compressor) ทำหน้าที่ดูดน้ำยาในสภาพที่เป็นไอจากเครื่องระเหย เพื่อทำให้ความดันในเครื่องระเหยลดต่ำลงจนสามารถทำให้น้ำยากลายเป็นไอและสร้างความเย็น พร้อมทั้งอัดให้น้ำยามีความดันสูงขึ้นจนสามารถควบแน่นเป็นของเหลวในคอนเดนเซอร์และส่งน้ำยาผ่านอุปกรณ์ต่างๆในวงจร

อุปกรณ์แยกน้ำยาเหลวหรือแอคคิวมูเลเตอร์ (Accumulator) ติดตั้งระหว่างเครื่องระเหยและคอมเพรสเซอร์ ทำหน้าที่ป้องกันของเหลวกลับเข้าคอมเพรสเซอร์ โดยน้ำยาที่ยังเดือดไม่หมดจากเครื่องระเหยจะตกลงด้านล่างคอมเพรสเซอร์จะดูดเฉพาะน้ำยาที่เป็นไอจากด้านบน ขณะทำงานน้ำมันหล่อลื่นที่ปนอยู่กับน้ำยาเหลวด้านล่างจะถูกดูดกลับมาใช้ในการหล่อลื่นใหม่

อุปกรณ์แยกน้ำมันหล่อลื่น (Oil Separator) ติดตั้งที่ทางออกของคอมเพรสเซอร์ ทำหน้าที่แยกน้ำมันหล่อลื่นที่ปนออกมากับน้ำยาให้กลับไปอ่างน้ำมันหล่อลื่น เพื่อรักษาระดับน้ำมันหล่อลื่นในคอมเพรสเซอร์ ไอน้ำยาที่ถูกแยกออกจึงถูกส่งไปเข้าคอนเดนเซอร์เพื่อใช้งานต่อไป

ถังพักสารทำความเย็นด้านความดันต่ำ (Low Pressure Receiver) ติดตั้งอยู่ทางออกของคอนเดนเซอร์ ทำหน้าที่รับน้ำยาเหลวที่ควบแน่นจากคอนเดนเซอร์เพื่อส่งไปทำความเย็นในเครื่องระเหย สถานะที่เป็นของเหลาวไว้ด้านล่าง ส่วนแก๊สที่ไม่กลั่นตัวจะลอยอยู่ด้านบนและสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลวจะถูกส่งไปยังตัวควบคุมสารทำความเย็น

ถังพักสารทำความเย็นด้านความดันสูง (High Pressure Receiver) ถังเก็บสารทำความเย็นสถานะแก๊สร้อนความดันสูง เพื่อส่งต่อไปยังคอนเดนเซอร์

ห้องเครื่องทำความเย็น 1 มีการปรับปรับปรุงระบบระบายอากาศโดยทำการติดตั้งท่อระบายลมขนาด 12 x 20 นิ้ว ติดตั้งพัดลมในการเติมอากาศเข้า (Supply Fan) ขนาด 4,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และติดตั้งพัดลมเพื่อดึงอากาศออกสู่ภายนอก (Exhaust Fan) ขนาด 4,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พร้อมทั้งติดตั้งหัวดูดแบบฝาชีครอบ (Canopy Hood) บริเวณเหนือเครื่องคอมเพรสเซอร์ทั้ง 2 เครื่อง (Figure 1)

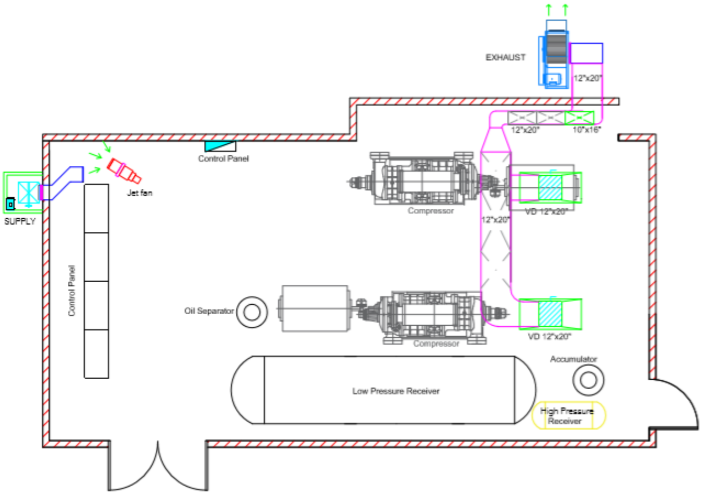


Figure 1 Refrigerating machinery room 1.

2.2 ห้องเครื่องทำความเย็น 2 มีขนาดพื้นที่ 66 ตารางเมตร หรือปริมาตรห้องเท่ากับ 231 ลูกบาศก์เมตร ภายในห้องมีช่องเปิด ภายในห้องจะมีช่องระบายอากาศจำนวน 2 ช่อง ช่องที่ 1 จะเป็นแบบช่องตะแกรง กว้าง 2.5 เมตร ยาว 1.2 เมตร ช่องที่ 2 จะเป็นช่องหน้าต่างด้านบนเปิด 90 องศา กว้าง 2.5 เมตร ยาว 0.90 เมตรและด้านล่างเป็นแบบช่องตะแกรง กว้าง 2.5 เมตร ยาว 0.90 เมตร ภายในห้องมีการติดตั้งพัดลมบริเวณผนังฝังประตูทางเข้า จำนวน 2 ตัว เพื่อระบายความร้อนภายในห้องเครื่องทำความเย็น (Figure 2)

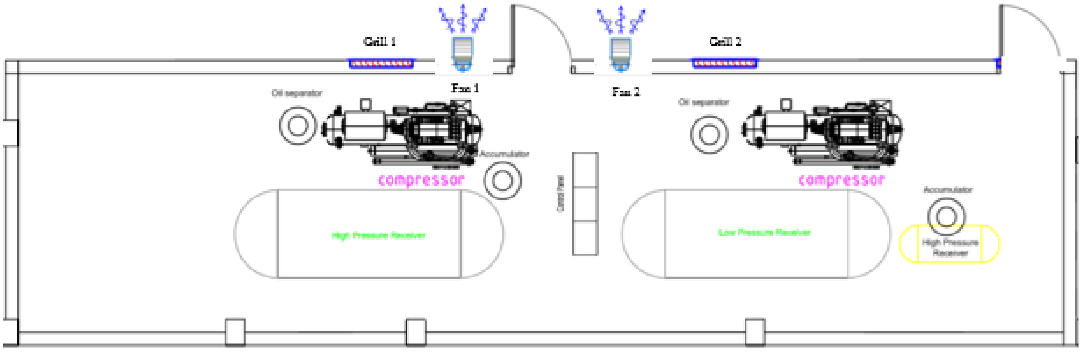


Figure 2 Refrigerating machinery room 2.

3. วิเคราะห์ระบบระบายอากาศภายในห้องเครื่องทำความเย็น 1 ภายหลังการปรับปรุงเปรียบเทียบกับกฎหมายและมาตรฐานการระบายอากาศห้องเครื่องทำความเย็น
4. ออกแบบระบบระบายอากาศภายในห้องเครื่องทำความเย็น 2 ให้สอดคล้องตามกฎหมายและมาตรฐานที่กำหนด

ผลการทดลองและวิจารณ์

วิเคราะห์ระบบระบายอากาศภายในห้องเครื่องทำความเย็น 1 ภายหลังการปรับปรุงเปรียบเทียบกับกฎหมายและมาตรฐานการระบายอากาศห้องเครื่องทำความเย็น

1. วิเคราะห์ตามกฎกระทรวง กำหนดมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับระบบทำความเย็นที่ใช้เป็นสารทำความเย็นในโรงงาน พ.ศ.2554

โดยการหาอัตราการไหลของอากาศ (Q) สภาวะปกติ คำนวณได้จาก

$$Q = V \times ACH$$

เมื่อ

Q = อัตราการไหลของอากาศหน่วยลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (cfm)

V = ปริมาตรห้องมีหน่วยเป็นตารางฟุต

ACH = จำนวนรอบของการไหลเวียนอากาศต่อหนึ่งชั่วโมง

$$Q = 250 \times 35.315 \times 3 \times \frac{1}{60}$$

$$Q = 441.43 \text{ cfm}$$

2. วิเคราะห์ตามระบบปรับอากาศและระบายอากาศ วสท.031001-59

โดยการหาอัตราการไหลของอากาศ (Q) สภาวะปกติ คำนวณได้จาก

$$Q = A \times 2.5 \text{ L/s}$$

เมื่อ

Q = ปริมาณอากาศไหลในหน่วยลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (cfm)

A = พื้นที่ห้องมีหน่วยเป็นตารางเมตร

$$Q = 50 \times 2.5 \text{ L/s}$$

$Q = 125$ L/s หรือเท่ากับ 264.86 cfm

โดยการหาอัตราการไหลของอากาศ (Q) สภาวะฉุกเฉิน คำนวณได้จาก

$$Q = 70\sqrt{G}$$

เมื่อ

Q = ปริมาณอากาศไหลในหน่วยลิตรต่อวินาที

G = มวลของสารทำความเย็นในหน่วยกิโลกรัม ที่บรรจุอยู่ในระบบที่ใหญ่ที่สุดที่ติดตั้งในห้องเครื่องทำความเย็น เท่ากับ 1,786 กิโลกรัม

$$Q = 70\sqrt{1,786}$$

$Q = 2,958.28$ L/s หรือเท่ากับ 6,268.24 cfm

3. วิเคราะห์ตามมาตรฐาน American National Standards Institute of Ammonia Refrigeration

(ANSI/IIAR)

โดยการหาอัตราการไหลของอากาศ (Q) สภาวะปกติ คำนวณจาก

$$Q = V \times ACH$$

เมื่อ

Q = อัตราการไหลของอากาศหน่วยลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (cfm)

V = ปริมาตรห้องมีหน่วยเป็นตารางฟุต

ACH = จำนวนรอบของการไหลเวียนอากาศต่อหนึ่งชั่วโมง

$$Q = 250 \times 35.315 \times 20 \times \frac{1}{60}$$

$$Q = 2{,}942.89 \text{ cfm}$$

โดยการหาอัตราการไหลของอากาศ (Q) สภาวะฉุกเฉิน คำนวณจาก

$$Q = 250 \times 35.315 \times 30 \times \frac{1}{60}$$

$$Q = 4{,}414.33 \text{ cfm}$$

การวิเคราะห์ระบบระบายอากาศจากการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศภายในห้องเครื่องทำความเย็น 1 ภายหลังการปรับปรุงที่เพิ่มอัตราการไหลของอากาศภายในห้อง 4,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เปรียบเทียบกับกฎหมายและมาตรฐานการระบายอากาศห้องเครื่องทำความเย็นในสภาวะปกติ และสภาวะฉุกเฉิน (Table 2)

Table 2 Analysis of ventilation system in refrigerating machinery room 1.

Law and ventilation standards	Minimum ventilation (cfm)		After improvement of ventilation (%)	
	Normal	Emergency	Normal	Emergency
1. Law	441	-	9	-
2. Thai standard	265	6,268	15	0.64
3. National standard	2,943	4,414	1.36	0.91

1. Law = Ministerial Regulations on Safety Measures Refrigeration Systems Using Ammonia as Refrigerants in Factory 2011.
2. Thai standard = Air Conditioning and Ventilation Standard by The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage.
3. National Standard = American National Standard Institute /International Institute of Ammonia Refrigeration (ANSI/IIAR).

ผลออกแบบระบบระบายอากาศภายในห้องเครื่องทำความเย็น 2 ให้สอดคล้องตามกฎหมายและมาตรฐานที่กำหนด

จากการคำนวณหาความต้องการอัตราการไหลภายในห้องเครื่องทำความเย็น 2 สภาวะปกติที่ 2,719.26 ลบ.ฟุต/นาที ซึ่งได้จากการคำนวณความต้องอัตราการระบายอากาศอย่างน้อย 20 ACH ตามมาตรฐาน American National Standard Institute /International Institute of Ammonia Refrigeration (ANSI/IIAR) และสภาวะฉุกเฉินที่ 6,400 ลบ.ฟุต/นาที ซึ่งได้จากการคำนวณความต้องอัตราการระบายอากาศตามมาตรฐานระบบปรับอากาศและระบายอากาศ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 พ.ศ. 2559 เพื่อให้การออกแบบระบบระบายอากาศภายในห้องเครื่องสามารถรองรับสถานะการการเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการคำนวณและออกแบบระบบระบายอากาศภายในห้องเครื่องทำความเย็น 2 (Table 3)

Table 3 Guideline for design ventilation systems in the refrigerating machinery room 2.

Description	Coefficient (C)	Velocity (fpm)	Velocity pressure (in.wg)	Static loss (in.wg)
1.<u>Major loss</u>				
Straight Duct 16 ft 1 Pcs.	0.1			0.0160
2.<u>Minor loss</u> (Fitting : Supply air duct)				
2.1 D Elbow, Rectangular, Mitered, H/W=0.643	1.3	1164	0.08447	0.1098
2.2 G Symmetrical Wye, Dovetail, Rectangular, H/W=0.223	0.223	1164	0.08447	0.0188
2.3 A Contraction, round and Rectangular, Gradual to Abrupt, A1/A=4, θ=90	0.17	1396	0.12150	0.0207
2.4 B Transition, Rectangular, A1/A=4, θ=60	0.61	1396	0.12150	0.0741
2.5 G Damper, Butterfly, Airfoil Blade, Rectangular, θ=30	4	1396	0.12150	0.4860
2.6 Equipment, EAG 2 Pcs.				0.1660
Total				0.891
Safety Factor 20%				0.178
Total Static Pressure				1.070

สรุปผล

จากการวิเคราะห์ระบบระบายอากาศในห้องเครื่องทำความเย็น 1 ที่ทำการติดตั้งพัดลมเพื่อระบายอากาศออก(Exhaust Fan) ขนาด 4,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที โดยมีการคำนวณอัตราการไหลของอากาศภายในห้องสอดคล้องตามกฎหมาย สอดคล้องตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ และมาตรฐาน ANSI/IIAR 2-2008 ที่ 441.44, 264.86 และ 2,942.62 ลบ.ฟุต/นาที ตามลำดับ การวิเคราะห์เลือกใช้พัดลมมีขนาดเพียงพอและเหมาะสมในกรณีที่มีการระบายอากาศในสภาวะปกติ แต่ไม่สอดคล้องกับมาตรฐานในสภาวะฉุกเฉิน ซึ่งจะต้องทำการปรับปรุงระบบระบายอากาศให้มีอัตราการไหลอากาศไม่น้อยกว่า 6,268.24 ลบ.ฟุต/นาที เพื่อระบายก๊าซแอมโมเนียรั่วไหลภายในห้อง

สำหรับคำนวณการออกแบบระบบระบายอากาศห้องเครื่องทำความเย็น 2 สภาวะปกติที่ 2,719.26 ลบ.ฟุต/นาที และออกแบบระบบระบายอากาศในสภาวะฉุกเฉินที่ 6,400 ลบ.ฟุต/นาที เป็นการออกแบบเพื่อใช้งานในสภาวะฉุกเฉิน เพื่อระบายก๊าซแอมโมเนียออกสู่ภายนอกห้องให้เร็วที่สุด วัตถุประสงค์ของการระบายออก

เพื่อดึงก๊าซที่มีความเข้มข้นมากไปเจือจางในอากาศและลดการสัมผัสปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่เข้มข้นมากภายในห้อง ซึ่งก๊าซแอมโอเนียที่มีความเข้มข้นมากอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพร่างกายแก่ผู้ปฏิบัติงานได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิชาต แจ้งบำรุง ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ข้อคิดเห็นต่างๆ เพื่อความสมบูรณ์ของการศึกษาครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงตรงตามวัตถุประสงค์เป้าหมายที่ตั้งไว้

เอกสารอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. **คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูงแอมโมเนีย** (Ammonia).

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2554. **กฎกระทรวง กำหนดมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นในโรงงาน.** 21 มีนาคม 2554.

จันทร์ประภา พุ่มประเสริฐ. 2553. **การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบของการวิเคราะห์และออกแบบระบบปรับสภาวะอากาศ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วันทนี พันธุ์ประสิทธิ์, 2549. **การระบายอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม.** ภาควิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล.

สุทธิพงศ์ โลหะรังสิกุล. 2549. **การคำนวณเวลาสำหรับแผนอพยพกรณีสารทำความเย็นประเภทแอมโมเนียรั่วไหลในห้องเย็น.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิทยา อยู่สุข, 2554. **การระบายอากาศประยุกต์.** ภาควิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2559. **มาตรฐานระบบปรับอากาศและระบายอากาศ.** พิมพ์ครั้งที่ 4. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

สุภาณี นพรัตน์. 2553. **การทำนายการแพร่กระจายตัวของแอมโมเนียที่รั่วไหลเพื่อออกแบบระยะทางที่ปลอดภัยในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน.** การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

American National Standard/International Institute of Ammonia Refrigeration. 2008. **Equipment, Design, & Installation of Closed-Circuit Ammonia Mechanical Refrigerating Systems** (Online). http://web.iiar.org/membersonly/PDF/CO/ANSI_IIAR2_2008AddendumB.pdf, October 9, 2019

การพัฒนาประสิทธิภาพระบบยืนยันตัวตนด้วยกระบวนการยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียว สำหรับระบบสารสนเทศของมหาวิทยาลัย

The Improvement of Authentication System for University Applications Using Single Sign-On

มหาราช ทศศะ[1*]

Maharat Tossa[1*]

บทคัดย่อ

การใช้งานแอปพลิเคชันบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทุกระบบต้องมีระบบการลงบันทึกเข้าใช้ เพื่อระบุและตรวจสอบสิทธิการเข้าใช้แอปพลิเคชันของผู้ใช้งาน รูปแบบการยืนยันตัวตนที่นิยมใช้ผ่านโปรโตคอลแอลดีเอพี (LDAP) อย่างไรก็ตามการยืนยันตัวตนด้วยโปรโตคอลแอลดีเอพี แอปพลิเคชันต้องมีระบบการลงบันทึกเข้าใช้ มีความเสี่ยงในการใช้งาน ในกรณีแอปพลิเคชันมีช่องโหว่ใหม่ ที่ยังไม่เคยพบมาก่อนในส่วนของโปรแกรมหรือระบบปฏิบัติการ การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียวด้วยโปรโตคอลโอออท 2.0 สำหรับระบบสารสนเทศของมหาวิทยาลัย เปรียบเทียบการยืนยันตัวตนด้วยโปรโตคอลแอลดีเอพี โดยจำลองสร้างการเรียกใช้บริการยืนยันตัวตนไปยังเครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรี ทำการวัดโหลดการทำงานของหน่วยประมวลผล และหน่วยความจำ ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียว ช่วยให้ผู้ใช้ได้รับความสะดวกและมีความปลอดภัยมากขึ้น สามารถลดความเสี่ยงจากการดักจับรหัสผ่านของผู้ใช้บนแอปพลิเคชันได้ และลดการใช้งานทรัพยากรระบบได้ร้อยละ 85

ABSTRACT

All application on the internet need to use the login system to identify and authenticate users. LDAP is used popularly for authentication but if the system vulnerability which not found before that cause the system risk. The objective of this research is studying and analysis the efficiency of Single Sign-On using OAuth 2.0 protocol authentication to compare different systems with LDAP protocol authentication on the university's Information systems. Simulation based on Directory Server; processor and memory work load. The result of research shows that Single Sign-On using OAuth 2.0 protocol authentication provide more convenient and safety system for users, reduce the risk of password hacking and can reduce the system resource usage by 85%.

Key words: authentication, single sign-on, identity provider, access token

* Corresponding author; e-mail address: maharat.t@ku.ac.th

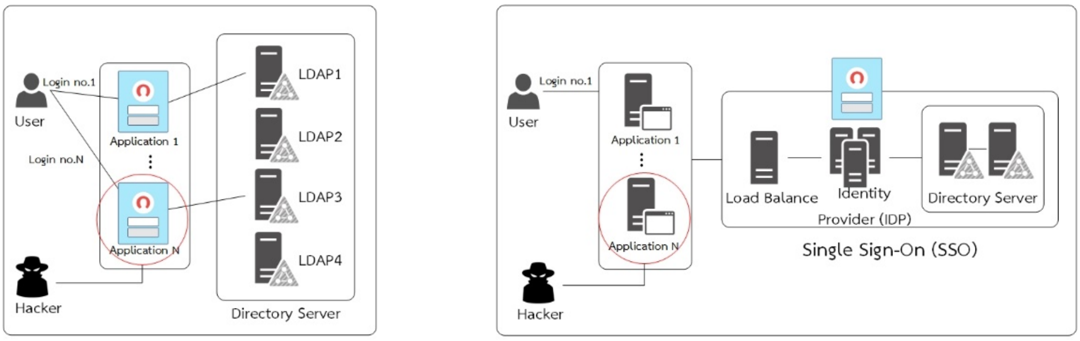
[1]สำนักบริการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Office of Computer Services, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การใช้งานแอปพลิเคชันบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตมีใช้งานอย่างแพร่หลาย ผู้ให้บริการแอปพลิเคชันจำเป็นต้องมีระบบการลงบันทึกเข้าใช้ (login) เพื่อระบุและตรวจสอบสิทธิการเข้าใช้งานของผู้ใช้บริการ รูปแบบการยืนยันตัวตน (authentication) ที่นิยมใช้โดยใช้ผ่านโปรโตคอลแอลดีเอพี (LDAP) ซึ่งเป็นโปรโตคอลมาตรฐานที่ต้องใช้ข้อมูลบัญชีผู้ใช้ และรหัสผ่าน สำหรับการยืนยันตัวตนกับเครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรี (directory server) การดำเนินการเชื่อมต่อแอปพลิเคชันที่ใช้งานกับเครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรี ต้องได้รับอนุญาตให้สามารถเชื่อมต่อเพื่อตรวจสอบสิทธิของบัญชีผู้ใช้กับรหัสผ่าน พบว่าการยืนยันตัวตนด้วยโปรโตคอลแอลดีเอพีมีความเสี่ยงในการใช้งาน เนื่องจากแอปพลิเคชันต้องมีระบบการลงบันทึกเข้าใช้ของตนเอง กรณีแอปพลิเคชันมีช่องโหว่ใหม่ที่ยังไม่เคยพบมาก่อนของโปรแกรมหรือระบบปฏิบัติการ (vulnerability) ผู้ไม่ประสงค์ดีสามารถดักจับข้อมูลบัญชีผู้ใช้และรหัสผ่านของผู้ใช้บริการ ร่วมถึงข้อมูลส่วนบุคคลอื่นๆ แล้วนำข้อมูลไปใช้ในการเข้าถึงระบบโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือสร้างความเสียหาย กรณีที่มีแอปพลิเคชันปลายทางมีจำนวนมาก หรือการเข้าใช้บริการที่ไม่ครบขั้นตอนการทำงานตามโปรโตคอล เช่น การขอเปิดการเชื่อมต่อ แล้วไม่ยกเลิกการเชื่อมต่อ ส่งผลให้เครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรี ต้องรอสถานะตอบยืนยันว่าปิดการเชื่อมต่อบริการไดเรกทอรี หรือไม่

ไดเรกทอรีเซอร์วิส (directory services) คือการบริหารจัดการข้อมูลผู้ใช้จากส่วนกลาง มีเครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรีทำหน้าที่เก็บข้อมูลรายละเอียดของผู้ใช้ทั้งหมด เช่น ชื่อบัญชีผู้ใช้ รหัสผ่าน ที่อยู่ รวมถึงสิทธิการเข้าใช้งานระบบต่างๆ ไดเรกทอรีเซอร์วิสออกแบบให้มีลักษณะการอ่านมากกว่าการบันทึกข้อมูล ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ให้บริการผ่านโปรโตคอลแอลดีเอพี (Lightweight Directory Access Protocol หรือ LDAP) (Sermersheim, 2006) บน TCP/IP ที่พัฒนาจากมาตรฐาน X.500 เพื่อสร้างมาตรฐานไดเรกทอรีใหม่ที่ง่ายและยืดหยุ่นต่อการใช้งาน สำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรีกับเครื่องลูกข่าย แบบไคลเอนต์-เซิร์ฟเวอร์



a b

Figure 1 LDAP protocol authentication (a) and OAuth 2.0 protocol authentication (b).

การยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียว (Single Sign-On: SSO) เป็นวิธีการเพื่อแก้ปัญหาความปลอดภัย และอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้โดยการยืนยันตัวตนเพียงครั้งเดียว ผ่านโปรโตคอลโอออท 2.0 สามารถเข้าใช้แอปพลิเคชันทุกระบบที่มีสิทธิโดยไม่ต้องยืนยันตัวตนซ้ำ ลดระยะเวลา และความยุ่งยากในการเข้าใช้งาน

โอออท 2.0 (Hardt, 2012) เป็นมาตรฐานการตรวจสอบสิทธิและยืนยันตัวตนกับผู้ให้บริการพิสูจน์และยืนยันตัวตน (Identity Provider หรือ IDP) แอปพลิเคชันใช้ข้อมูลโทเค็นการเข้าถึง (access token) แทนการใช้บัญชีผู้ใช้และรหัสผ่านในการยืนยันเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลของผู้ใช้ ขั้นตอนการร้องขอข้อมูลโทเค็นการเข้าถึง

เรียกว่าการให้สิทธิอนุญาต (authorization grant) รูปแบบที่เหมาะสมกับการให้บริการเว็บแอปพลิเคชัน คือ แบบรหัสการอนุญาต (authorization code)

การวิจัยครั้งนี้ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลการพัฒนาประสิทธิภาพระบบยืนยันตัวตนด้วยกระบวนการยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียว ด้วยโปรโตคอลโอออท 2.0 (OAuth 2.0) [RFC 6749] ที่ใช้กระบวนการร้องขอข้อมูลโทเค็นการเข้าถึงในรูปแบบรหัสการอนุญาต (authorization code) สำหรับระบบสารสนเทศของมหาวิทยาลัย โดยเปรียบเทียบกับวิธีการยืนยันตัวตนเดิมที่ใช้โปรโตคอลแอลดีเอพี ในด้านความมั่นคงปลอดภัยและด้านประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และวิธีการ

ประชากรที่ศึกษา

สมาชิกเครือข่ายนนทรีสถานะปัจจุบันทั้งหมด มีจำนวน 82,821 บัญชี แบ่งออกเป็น นิสิต 73,307 บัญชี บุคลากร 9,514 บัญชี แอปพลิเคชันที่เข้าใช้บริการระบบยืนยันตัวตนด้วยโปรโตคอลแอลดีเอพี จำนวน 175 แอปพลิเคชัน และแอปพลิเคชันที่เข้าใช้บริการโปรโตคอลโอออท 2.0 จำนวน 10 แอปพลิเคชัน

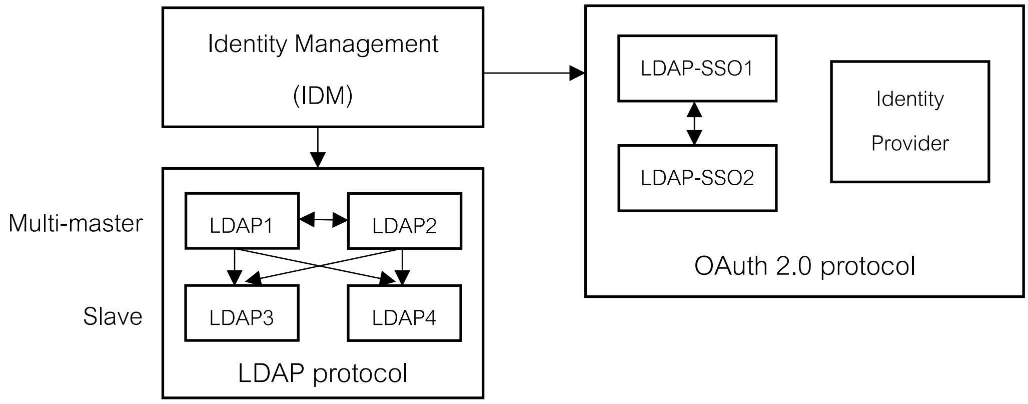


Figure 2 LDAP protocol and OAuth 2.0 protocol authentication's structure

เครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรีสำหรับโปรโตคอลแอลดีเอพี จำนวน 4 เครื่อง มีโครงสร้างการเชื่อมต่อแบบ Multi-master และ Slave ข้อมูลบัญชีผู้ใช้เท่ากันทุกเครื่องให้บริการแบบไคลเอนต์-เซิร์ฟเวอร์ โดยไม่มี Load Balancing ให้บริการ แอปพลิเคชันเลือกลำดับการเชื่อมต่อใช้บริการไดเรกทอรีเซอร์วิสเอง สำหรับเครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรีโปรโตคอลโอออท 2.0 จำนวน 2 เครื่อง มีโครงสร้างการเชื่อมต่อแบบ Active/Standby

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรีสำหรับทดสอบประสิทธิภาพ และเครื่องลูกข่ายสำหรับวัดทดสอบประสิทธิภาพ โดยเครื่องแม่ข่ายติดตั้งซอฟต์แวร์ “389 Directory Server” ที่พัฒนาโดย Red Hat ในฐานะส่วนหนึ่งของโครงการ Fedora

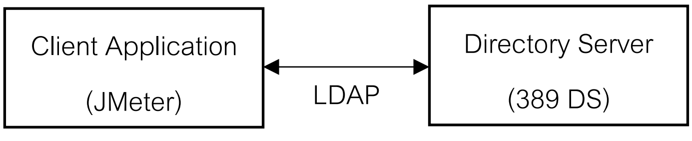


Figure 3 The performance testing of authentication's structure with network connection by 1Gb/s.

Table 1 Directory Server and Client Application’s performance testing.

	Processors	Memory	Storage	Operating system
Directory server	2vCPU Intel(R) Xeon(R) 2.40GHz	2GB	50GB	Linux CentOS7 64bit
Client application	4vCPU Intel(R) Xeon(R) 2.40GHz	4GB	50GB	Windows 8.1

2. ซอฟต์แวร์ทดสอบประสิทธิภาพ Apache-Jmeter-5.1.1

3. โปรแกรมตรวจสอบโหลดการทำงานบนเครื่องแม่ข่ายระบบปฏิบัติการ Linux

3.1. iostat ใช้ตรวจสอบโหลดการทำงานหน่วยประมวลผล และหน่วยจัดเก็บข้อมูล

3.2. vmstat ใช้ตรวจสอบโหลดการทำงานหน่วยความจำ

วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลบันทึกสถิติการยืนยันตัวตนด้วยโปรโตคอลแอลดีเอพี จากเครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรี จำนวน 4 เครื่อง และสถิติการยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียวด้วยโปรโตคอลโอออท 2.0 จากเครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรีสำหรับการยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียว เนื่องจากทำงานแบบ Active/Standby จึงใช้ข้อมูลสถิติจำนวน 1 เครื่อง ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2562 ถึง วันที่ 31 ตุลาคม 2562 เป็นเวลา 31 วัน แบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ วันทำการจำนวน 21 วัน และวันหยุดราชการจำนวน 10 วัน

การวัดประสิทธิภาพโดยใช้ซอฟต์แวร์ทดสอบ Apache-Jmeter ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สที่พัฒนาโดย Apache Software Foundation มีความสามารถทดสอบโหลดเพื่อวิเคราะห์และวัดประสิทธิภาพการทำงานของระบบ สำหรับจำลองสร้างคำสั่งร้องขอใช้บริการ (LDAP request) ไปยังเครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรีที่สร้างขึ้นใหม่ เพื่อหาผลลัพธ์โหลดการทำงานสูงสุด (maximum load) ของปริมาณงาน (throughput) ที่ระบบสามารถรองรับการให้บริการ โดยเริ่มจากจำลองการเรียกใช้บริการยืนยันตัวตนด้วยโปรโตคอลแอลดีเอพี ในระดับต่ำ (10 request per seconds) เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ต่อเนื่องทุกวินาทีจนซอฟต์แวร์ที่ให้บริการระบบยืนยันตัวตนไม่สามารถตอบสนองต่อการเรียกใช้งานได้หรือมีค่าผิดพลาด (error) เกิดขึ้น ทำการวัดโหลดการทำงานของหน่วยประมวลผล (processors) หน่วยความจำ (memory) และผลลัพธ์ของปริมาณงานที่ได้ (throughput)

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลแบ่งเป็นช่วงวันทำการและช่วงวันหยุดราชการ แล้วนำข้อมูลมาคำนวณค่าเฉลี่ยรายวันแต่ละช่วงเวลา แบ่งออกเป็นทุกชั่วโมงจำนวน 24 ชุด ตั้งแต่เวลา 00:00 – 23:59 น. การเข้าใช้บริการยืนยันตัวตนด้วยโปรโตคอลแอลดีเอพี มีค่าเฉลี่ยรายวันช่วงวันทำการ จำนวน 692,411 ครั้ง ช่วงวันหยุดราชการ จำนวน 291,179 ครั้ง พบว่าช่วงวันทำการมีปริมาณการใช้งานที่สูงกว่าช่วงวันหยุดราชการร้อยละ 57.95 จึงนำข้อมูลช่วงวันทำการ เป็นข้อมูลสถิติตั้งต้นสำหรับการทดสอบ โดยข้อมูลการยืนยันตัวตนด้วยโปรโตคอลแอลดีเอพี จำนวน 29,483 บัญชี เปรียบเทียบกับการยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียวด้วยโปรโตคอลโอออท 2.0 พบว่าการลงชื่อเข้าใช้ลดลง 602,488 ครั้ง หรือร้อยละ 87.01 การวิจัยครั้งนี้จึงนำข้อมูลดังกล่าว เป็นข้อมูลทดสอบสำหรับเปรียบเทียบ

Table 2 Average statistics of authentication on workday.

Type of authentication	Data		Comparative information	
	LDAP	OAuth 2.0	LDAP	OAuth 2.0
Number of Account	29,483	2,699	29,483	29,483
Number of authentication	692,411	8,257	692,411	90,196
Number of authentication per account	23.48	3.05	23.48	3.05
Maximum of workload (time/hour)	59,957	819	59,957	8,947
Maximum of workload (time/second)	16.65	0.23	16.65	2.5

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

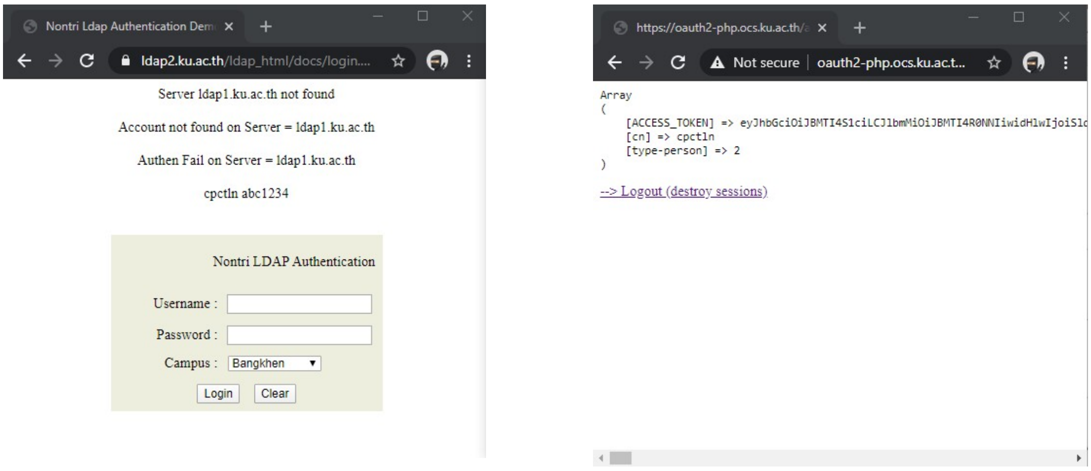
ด้านความมั่นคงปลอดภัย

การยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียวด้วยโปรโตคอลโอออท 2.0 มีความปลอดภัยจากภัยคุกคามประเภทความพยายามรวบรวมข้อมูล ในการดักจับข้อมูลบัญชีผู้ใช้และรหัสผ่านบนเว็บแอปพลิเคชัน มากว่าการให้บริการยืนยันตัวตนด้วยโปรโตคอลแอลดีเอพี

Table 3 The result of security data analysis.

Result	LDAP	OAuth 2.0
Sniffing password	practicable	impracticable
Session Hijacking and Man-in-the-Middle Attacks	practicable	difficult to practical (the state parameter as a session key)

ตัวอย่างการจำลองเหตุการณ์ของการดักจับข้อมูลรหัสผ่านของผู้ใช้ บนเว็บแอปพลิเคชัน



a b

Figure 4 Simulation of LDAP protocol authentication (a) / OAuth 2.0 protocol authentication (b).

ภาพที่ 4 (a) การยืนยันตัวตนด้วยโปรโตคอลแอลดีเอพี แอปพลิเคชันต้องมีระบบการลงบันทึกเข้าใช้ (login) ของตนเอง กรณีมีช่องโหว่ใหม่ที่ยังไม่เคยพบมาก่อนของโปรแกรมหรือระบบ (vulnerability) ผู้ไม่ประสงค์

สามารถปรับแก้ไขแอปพลิเคชันหรือระบบเพื่อดักจับข้อมูลบัญชีผู้ใช้และรหัสผ่าน รวมถึงข้อมูลส่วนบุคคลอื่น ๆ ของผู้ใช้ได้ ภาพที่ 4 (b) การยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียวด้วยโปรโตคอลโอออท 2.0 นั้นแอปพลิเคชันไม่มีฟอร์มหรือระบบการลงชื่อเข้าใช้ของตนเอง การยืนยันตัวตนของผู้ใช้อยู่ที่ผู้ให้บริการพิสูจน์และยืนยันตัวตนส่วนกลาง เพื่อความปลอดภัยกรณีที่ผู้ไม่ประสงค์ดีบุกรุกแอปพลิเคชันได้สำเร็จ ก็ไม่สามารถดักจับข้อมูลรหัสผ่านได้ เนื่องจากผู้ให้บริการพิสูจน์และยืนยันตัวตน ใช้ข้อมูลโทเค็นการเข้าถึงแทนการใช้บัญชีผู้ใช้และรหัสผ่านในการยืนยันเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลของผู้ใช้

ด้านประสิทธิภาพ

จากการทดสอบการเรียกใช้งานพร้อมกันจำนวนมากไปยังเครื่องแม่ข่ายบริการไดเรกทอรี ได้ผลลัพธ์ประสิทธิภาพของบริการยืนยันตัวตน สามารถรองรับการยืนยันตัวตนพร้อมกันเริ่มต้นขั้นต่ำที่ 10 ครั้งต่อวินาที และเพิ่มจำนวนการยืนยันตัวตนต่อเนื่อง ระบบสามารถรองรับการให้บริการได้สูงสุด (maximum load) ที่ 170 ครั้งต่อวินาที ผลลัพธ์ของปริมาณงาน (throughput) ได้ตามระยะเวลาที่กำหนด ไม่มีค่าผิดพลาดเกิดขึ้น โหลดการทำงานของหน่วยประมวลผลมีค่าประมาณร้อยละ 50 โหลดการทำงานของหน่วยความจำมีค่าประมาณร้อยละ 10 และเมื่อทำการเพิ่มจำนวนการยืนยันตัวตนไปจนถึง 200 ครั้งต่อวินาที พบว่าโหลดการทำงานของหน่วยประมวลผลมีค่าคงที่ร้อยละ 50 หน่วยความจำมีค่าคงที่ร้อยละ 10 ผลลัพธ์ของปริมาณงานที่ได้ ใช้ระยะเวลามากกว่าที่กำหนด และมีค่าความผิดพลาดเพิ่มสูงขึ้น

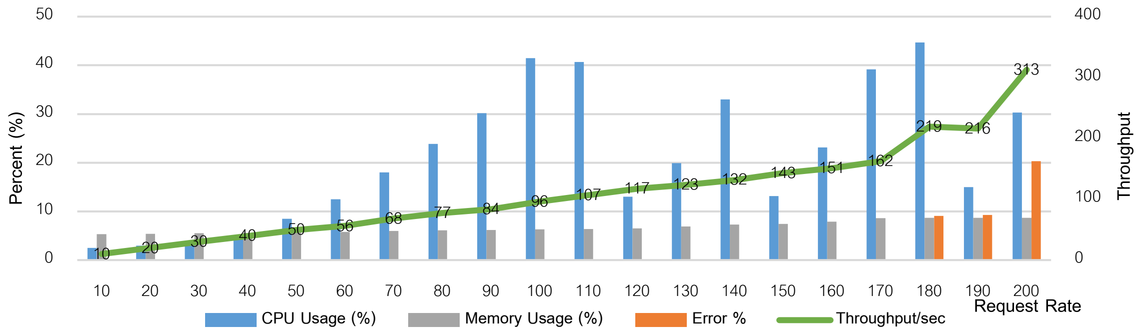


Figure 5 The performance testing of LDAP protocol authentication.

จากข้อมูลผลลัพธ์การทดสอบวัดประสิทธิภาพเบื้องต้น ภาพที่ 5 และข้อมูลสถิติการใช้งานยืนยันตัวตนของผู้ใช้ช่วงวันทำการ ของตารางที่ 2 โดยนำข้อมูลการยืนยันตัวตนค่าสูงสุด ของโปรโตคอลแอลดีเอพี 16.65 ครั้งต่อวินาที และโปรโตคอลโอออท 2.0 จำนวน 2.51 ครั้งต่อวินาที สำหรับการเปรียบเทียบด้านประสิทธิภาพ

Table 4 The result of efficiency data analysis.

	Maximum workload	LDAP	OAuth 2.0
Maximum of authentication (time/second)	170	16.65 (9.79%)	2.51 (1.48%)
Service support per second	-	90.21%	98.52%
Processors (MHz)	2457.6	240.6	36.4
Memory (MB)	204.8	20.05	3

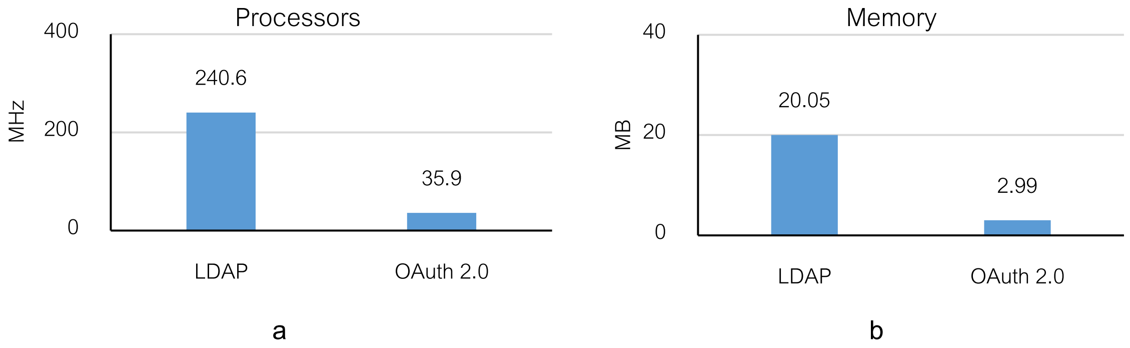


Figure 6 Processor workload (a) and Memory workload (b).

จากผลลัพธ์การทดสอบประสิทธิภาพเพื่อวัดโหลดการทำงานสูงสุด ที่ระบบสามารถรองรับการให้บริการยืนยันตัวตนเพิ่มได้สูงสุด สำหรับโปรโตคอลแอลดีเอพีรองรับการให้บริการเพิ่มได้ 153.35 ครั้งต่อวินาที และโปรโตคอลโอออท 2.0 รองรับการการให้บริการเพิ่มได้ 167.49 ครั้งต่อวินาที พบว่าโหลดการใช้งานโปรโตคอลโอออท 2.0 ใช้หน่วยประมวลผล และหน่วยความจำน้อยกว่า โปรโตคอลแอลดีเอพี ประมาณร้อยละ 85

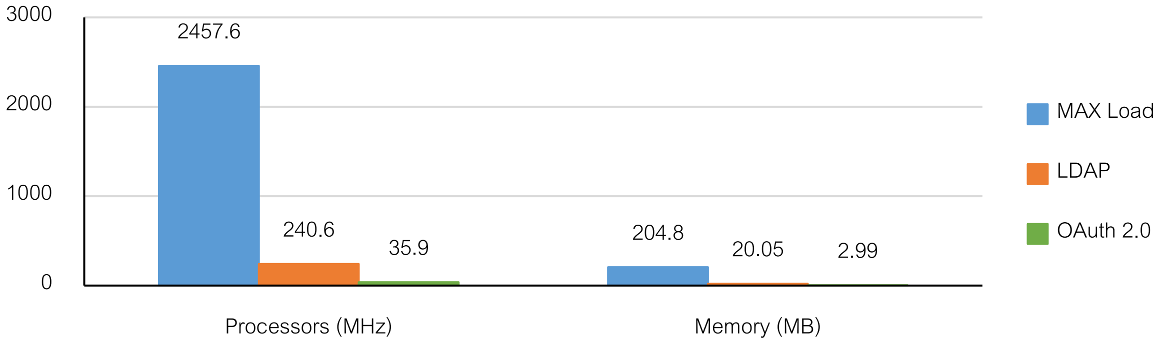


Figure 7 System resource usage.

ดังนั้นสรุปได้ว่า การให้บริการยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียวด้วยโปรโตคอลโอออท 2.0 สามารถลดการใช้งานทรัพยากรของระบบได้ประมาณร้อยละ 85

สรุป

การพัฒนาประสิทธิภาพระบบยืนยันตัวตนด้วยกระบวนการยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียว (single sign-on) ผ่านโปรโตคอลโอออท 2.0 ช่วยให้การยืนยันตัวตนมีความสะดวก และมีความปลอดภัยมากขึ้น เนื่องจากผู้ใช้งานยืนยันตัวตนเพียงครั้งเดียวสามารถใช้งานได้ทุกแอปพลิเคชันที่มีสิทธิใช้งาน และจากการทดสอบประสิทธิภาพระบบพบว่าการใช้งานแบบยืนยันตัวตนครั้งเดียว ผ่านโปรโตคอลโอออท 2.0 ทำให้ลดการใช้งานทรัพยากรของระบบได้ร้อยละ 85

สามารถลดความเสี่ยงจากภัยคุกคามประเภทความพยายามรวบรวมข้อมูล ของการดักจับบัญชีผู้ใช้และรหัสผ่านบนแอปพลิเคชันได้ โดยใช้ข้อมูลโทเค็นการเข้าถึง (access token) แทนการใช้บัญชีผู้ใช้และรหัสผ่านในการยืนยันเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลของผู้ใช้ อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องใน

การให้บริการตรวจสอบสิทธิและยืนยันตัวตน IDP ให้เหมาะสมต่อความต้องการใช้งานในองค์กร ควรมีระบบป้องกันความปลอดภัยต่างๆ ที่สามารถตรวจจับและป้องกันการบุกรุก (IDS/IPS) บนระบบเครือข่ายได้ และควรประชาสัมพันธ์การให้บริการยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียว นโยบายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องสำหรับการให้บริการยืนยันตัวตน รวมถึงช่องทางและแนวทางในการปรับปรุงแอปพลิเคชันจากระบบยืนยันตัวตนเดิมสู่ระบบใหม่ เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาสำหรับการพัฒนาและทดสอบระบบให้สามารถรองรับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเพิ่มจำนวนแอปพลิเคชันในการเข้าร่วมระบบยืนยันตัวตนแบบครั้งเดียวให้มากขึ้น แนวทางการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต ควรมีการศึกษาวิจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเพื่อให้ทราบข้อมูลด้านต่างๆ ได้แก่รูปแบบการให้บริการการใช้งาน รวมถึงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อการให้บริการยืนยันตัวตน

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมชาย นำประเสริฐชัย ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์ ที่ให้คำแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกๆ ท่าน ที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาแก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ช่วยสนับสนุน ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว ผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

ศูนย์ประสานการรักษาความมั่นคงปลอดภัยระบบคอมพิวเตอร์ประเทศไทย. 2562. **ข่าวสั้นและบทความ CYBER THREATS 2018** (Online). https://www.thaicert.or.th/downloads/files/Cyber_Threat_Alerts_2018.pdf, 10 ตุลาคม 2562.

สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์. 2560. **ขั้นตอนที่เกี่ยวกับการลงทะเบียนและพิสูจน์ตัวตนและการยืนยันตัวตนของดิจิทัลไอดี** (Online). https://www.digitalid.or.th/?p=9884, 9 ตุลาคม 2562.

สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (องค์การมหาชน) (สพร.). 2559. **การเข้าใช้งานแบบ Single Sign-On** (Online). https://www.egov.go.th/th/faq/784/23/, 9 ตุลาคม 2562.

Apache Software Foundation. 2019. **Apache JMeter** (Online). http://jmeter.apache.org/, October 12, 2019.

Hardt, D. 2012. **The OAuth 2.0 Authorization Framework** (Online). https://tools.ietf.org/html/rfc6749, October 10, 2019.

OAuth 2.0. 2019. **OAuth 2.0 Core** (Online). https://oauth.net/2/, October 10, 2019.

Okta. 2019. **Authorization Code Grant** (Online). https://www.oauth.com/oauth2-servers/server-side-apps/authorization-code/, October 10, 2019.

Sermersheim, J. 2006. **Lightweight Directory Access Protocol (LDAP): The Protocol** (Online). https://tools.ietf.org/html/rfc4511, October 10, 2019.

การศึกษาผู้โดยสารเพื่อการเปลี่ยนสายในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า ณ สถานีเตาปูน

A Study on Transferring Passengers in Morning Peak Time at Tao Poon Station

สุพล วิสุทธิสมบูรณ์[1*] และ วิชัย ศิวะโกศิษฐ[1]

Suphon Wisuthisomboon[1*] and Wichai Siwakosit[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงปัญหาการเปลี่ยนถ่ายระหว่างสายของ ระบบโครงการระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล และโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรมที่สถานีเตาปูนในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าซึ่งมีความหนาแน่นของผู้โดยสารที่รอคอยบริเวณชานชาลาสูง โดยครอบคลุมถึงพฤติกรรมเดินทางของโดยสาร ความตรงต่อเวลาในการให้บริการ ความถี่ของการให้บริการ ระยะเวลาในการรอคอย และการเปลี่ยนถ่ายผู้โดยสารเพื่อลดความหนาแน่นของผู้โดยสารที่รอคอยอยู่ในบริเวณชานชาลาของสถานี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงความถี่ของการให้บริการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล จะช่วยลดความหนาแน่นของสถานีเตาปูนได้ดี ซึ่งต้องมีการเพิ่มจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าอย่างเหมาะสม

ABSTRACT

This paper studies a problem of passenger transfer between Blue line and Purple line projects at Tao Poon interchange station during morning peak hours which causes overcrowded boarding platform area for the Blue Line. Passenger behaviour, punctuality, operational frequency, waiting time and passenger tranfer are accounted for in this study. The results show that an improvement of operational frequency of the Blue line may alleviate the overcrowed boarding platform problem effectively, which will require additional number of train of the Blue line for the morning peak hours operation.

Key words: railway, transferring, passenger, peak time, headway

* Corresponding author; e-mail address: **Banksuphon@gmail.com**

[1]ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]KURAIL, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

สถานีเตาปูนเป็นสถานีที่ใช้ในการเปลี่ยนถ่ายผู้โดยสารระหว่างโครงการระบบรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล (สายสีน้ำเงิน) และโครงการรถไฟฟ้ามหานครสายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วง) ในช่วงเดือนมิถุนายน – สิงหาคม 2562 สถานีเตาปูนเกิดปัญหาชานชาลาที่ใช้ในการรอขึ้นรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินมีผู้โดยสารที่เปลี่ยนถ่ายมาจากรถไฟฟ้าสายสีม่วงรอคอยอย่างหนาแน่นในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (07.00 – 09.00 น.) ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาถึงที่มาของปัญหาดังกล่าวและแนวทางในการบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ระบบ CCTV ,โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์,อุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่,อุปกรณ์บันทึกภาพและเสียง, คอมพิวเตอร์,เครื่องพิมพ์ และเครื่องสแกน

วิธีการ

ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และการตรวจเอกสาร คือ ศึกษาตัวชี้วัด มาตรฐาน ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรแทรกซ้อนที่มีผลต่อการผู้โดยสาร

เก็บข้อมูลการวิจัย และสังเกตลักษณะการเดินทางข้ามสาย เก็บข้อมูลผู้โดยสารที่ใช้งานจริง เพื่อให้ได้เวลาที่เกิดขึ้นจริง จับเวลาและสังเกตผู้โดยสารจากสถานที่จริง และ CCTV

วิเคราะห์ข้อมูล คือ สรุปผลนำข้อมูลมาวิเคราะห์เวลาที่ได้จากการวัด เพื่อคำนวณค่าออกมาเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ วิเคราะห์ปัญหาที่ให้ค่าเกินเกณฑ์ที่กำหนด และวิธีการปรับปรุงที่เหมาะสม

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ระยะห่างระหว่างขบวนรถ (Headway) คือ เวลารอรถไฟขบวนถัดไปหลังจากที่รถไฟขบวนก่อนหน้าออกไปจากชานชาลา จะแบ่งช่วงเวลาการให้บริการออกเป็นดังตารางที่1 (Table 1)

Table 1 Service time period.

Duration	Passenger volume
Peak hours	Moderate - Dense
Normal hours	Moderate
Off-peak hours	Little

ความหนาแน่นของผู้โดยสารในขบวนรถจะแบ่งออกเป็นระดับต่างๆ 5 ระดับ ตามตารางที่ 2

Table 2 Principle of passenger density in train.

Levels	Description
W0	Train without a passenger.
W1	Train boarding all passenger seats
W2	Train boarding all passenger seats and passengers stand density 4 persons/m^2
W3	Train boarding all passenger seats and passengers stand density 6 persons/m^2
W4 (Crush Load)	Train boarding all passenger seats and passengers stand density 8 persons/m^2

การแก้ไขปัญหาความหนาแน่นมีหลายวิธี) Sirikijpanichkul, A., (2018 ได้ยกตัวอย่าง เช่น การเพิ่มจำนวนขบวนรถ หรือ ตู้โดยสาร, การจัดการเดินรถ, การเพิ่มจำนวนราง, การปรับเปลี่ยนพฤติกรรมผู้โดยสารให้เดินทางนอกช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และการออกแบบการสัญจรในชานชาลาโดย (R.Vuchic, 2005) ได้อธิบายเวลาผู้โดยสารขึ้นลงขบวนรถ รถไฟประเภท Metro เท่ากับ 3ตู้ X 4ประตู =12 ประตู ต่อ 1 ขบวน ใช้เวลาระบบ 3 วินาที เวลาขึ้นรถ 0.6-1.4 วินาที/คน เวลาลงรถ 0.5 -1.2 วินาที/คน และระยะเวลาการเปิด-ปิดประตู (Seriani, S., (2018ได้แบ่งขั้นตอนออกเป็น เสียงเตือนเริ่ม) เสียงประกาศชื่อสถานี), รถไฟถึงสถานี, เสียงเตือนประตูเปิดและประตูเริ่มเปิด, ประตูเปิดเต็มบาน, ประกาศให้ผู้โดยสารลงจากรถ,ประกาศให้ผู้โดยสารเข้าไปด้านในที่ว่าง, เสียงสัญญาณปิดประตูรถ, ประตูรถเริ่มปิด, ประตูรถปิด, จบขั้นตอน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสุ่มวันทดลองเลือกจากวันที่ผู้โดยสารใช้บริการระหว่างรถไฟฟ้าสายสีม่วง กับ สายสีน้ำเงินที่มากที่สุดของเดือนจากการเก็บข้อมูลจำนวนผู้โดยสารทั้งเดือนซึ่งจะแสดงเห็นถึงปัญหาการเปลี่ยนถ่ายระหว่างสายของผู้โดยสารอย่างเด่นชัดแต่จะไม่เลือกวันที่เกิดปัญหาระบบขัดข้องในระบบรถไฟฟ้า ระดับ Major ขึ้นไป คือ เกิดเหตุล่าช้ามากกว่า 15 นาที เนื่องจากจะไม่ได้สะท้อนความสามารถในการขนถ่ายผู้โดยสารที่แท้จริงของระบบ โดยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกวันตัวอย่างมาทำการทดลอง 2 วัน ได้แก่ วันศุกร์ที่ 7 มิถุนายน 2562 กับ วันจันทร์ที่ 26 สิงหาคม 2562 โดยสาเหตุหนึ่งที่ผู้วิจัยไม่เลือกใช้ค่าเฉลี่ยของทั้งเดือนเพราะจะทำให้ค่าจำนวนผู้โดยสารที่หนาแน่นสูงสุดนั้นหายไปและค่าเฉลี่ยนั้นจะไม่ใช่ค่าที่เกิดขึ้นจริงซึ่งจะไม่สะท้อนถึงปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน

จำนวนผู้โดยสารเดินทางในสถานีเตาปูน ฝั่งขาล่อง หรือ SB (Southbound) จากวันศุกร์ที่ 7 มิถุนายน 2562 ช่วงเวลาเช้าและเย็นซึ่งจะเห็นว่าช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าจะมีระยะเวลาที่น้อยกว่าและจำนวนผู้โดยสารมากกว่าช่วงเย็นจึงทำให้เกิดปัญหา ณ สถานีเตาปูน ดังนั้นผู้วิจัยเล็งถึงปัญหาและทำการวิจัยช่วงเวลาดังกล่าว ดังตารางที่ 3 (Table 3)

Table 3 Passenger volume at tao poon station blue line sb platform, 7 June 2019.

Peak time in morning	Passenger volume from Purple line (PPDPH)	Passenger volume From Purple line and Tao Poon station (PPDPH)	Peak time in evening	Passenger volume from Blue line and Tao Poon station (PPDPH)
07.00-08.00	5,324	7,608	16.00-17.00	1,387
08.00-09.00	6,609	9,423	17.00-18.00	3,722
			18.00-19.00	6,375
			19.00-20.00	5,836

การคิดความสามารถในการรองรับผู้โดยสารต่อทิศทางต่อชั่วโมง (PPDPH) และค่า Load Factor (L.F.) คือ ค่าความสามารถในการรองรับผู้โดยสารสายสีม่วงในชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงิน ฝั่งขาล่อง โดยคิดจากค่าปริมาณผู้โดยสารที่ต่อแถวชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงิน ฝั่งขาล่องในช่วงชั่วโมงนั้น หารด้วย ค่าความสามารถสูงสุดในการรองรับผู้โดยสารของชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงิน ฝั่งขาล่อง โดยถ้า L.F. มีค่ามากกว่า 1 หมายถึงปริมาณ

ผู้โดยสารนั้นมีปริมาณมากกว่าความสามารถในการรองรับของชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงินผู้ให้บริการอาจมีการจัดลำดับการให้บริการหรือการกั้นผู้โดยสารชั้นสายสีม่วงไม่ให้ลงมาชั้นสายสีน้ำเงินเพื่อระบายผู้โดยสารในชั้นสีน้ำเงินก่อน ซึ่งอาจทำให้ผู้โดยสารเดินทางล่าช้าขึ้น ดังแสดงข้อมูลของวันศุกร์ที่ 7 มิถุนายน 2562 ในตารางที่ 4 (Table 4)

Table 4 Capability passengers/hour/direction of sb platform and Load Factor (L.F.), 7 Jun 2019.

Time	Accumulated passenger volume In-Out (Pass)	Maximum capacity of Blue Line Train (W4)	Number of Trips/Hour Headway 6.58 min	Maximum capacity of Blue Line Train (MaxBL)	L.F. (Pass/ (MaxBL)
07.00-08.00	7,608 persons	1,140 persons	8 trips	9,120 PPHPD	0.83
08.00-09.00	9,423 persons	1,140 persons	8 trips	9,120 PPHPD	1.03

ความสามารถในการรองรับผู้โดยสารสายสีม่วงในชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงิน ฝั่งขาล่อง ตามตารางที่ 5 (Table 5) แสดง PPDPH ของชั้นสายสีม่วง เวลา 08.00 – 09.00 ปริมาณเฉลี่ยจำนวนผู้โดยสารต่อขบวนรถสายสีม่วง พื้นที่ชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงิน ฝั่งขาล่อง ความสามารถรองรับสูงสุดของชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงินและความสามารถในการรองรับผู้โดยสารจากสีม่วงได้ 3.45 เที่ยว ถ้าเกิดมีเที่ยวที่ 4 เกิดขึ้นโดยไม่มีการระบายผู้โดยสารก็จะเต็มชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงินได้จนผู้ให้บริการต้องจัดลำดับการให้บริการ

Table 5 Maximum capacity of SB Platform at Tao Poon station, 7 Jun 2019 ,08.00 – 09.00.

Passenger volume from Purple Line	Average passengers Purple Line volume/Trip (Pass-PPL)	Area of Southbound Blue Line platform (for passengers in queue)	Maximum capacity of Blue Line (3 persons/m^2) (Max-cap)	Capacity for receiving passengers Purple Line (Max-cap/Pass-PPL)
6,609 PPDPH	826 persons	950 m^2	2,850 persons	3.45 trips

*Remark : Didn’t take the volume of passengers from Tao Poon station in calculate.

การจับเวลาความถี่ขบวนรถช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (7:00 – 9:00 น.) ของวันจันทร์ที่ 26 สิงหาคม ดังรูปที่ 1 (Figure 1) แสดงให้เห็นว่าความถี่ของขบวนรถไม่ได้สม่ำเสมอเนื่องจากช่วงก่อนชั่วโมงเร่งด่วนตารางเดินรถรถไฟฟ้าจะวิ่งจากสถานีต้นทางไปสิ้นสุดปลายทางทุกขบวน ขณะที่เข้าชั่วโมงเร่งด่วนจะมีรถไฟบางขบวนสิ้นสุดการให้บริการที่สถานีสวนจตุจักร เพื่อนำขบวนรถกลับไปรับผู้โดยสารในเมืองเพื่อลดความหนาแน่นของผู้โดยสาร

Goverde (2005) ได้แบ่งการล่าช้าแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การล่าช้าแบบปฐมภูมิ (Primary delay) คือความล่าช้าที่ต้องเกิดขึ้นไม่สามารถลดหรือหลีกเลี่ยงได้ และการล่าช้าแบบทุติยภูมิ (Secondary delays) คือความล่าช้าที่ขึ้นจากภายในระบบ แต่สามารถลดและหลีกเลี่ยงได้ (Xiaojuan and Zhang Qi, 2013) ได้ศึกษาการขนส่งจากสถานนีหนึ่งไปอีกสถานีหนึ่ง การปรับตารางเดินรถให้เหมาะสมจะช่วยลดความล่าช้า ให้เกิดความเหมาะสมมี 2 ประเภท คือ 1. การรวมเวลาเข้าออกตั้งแต่เข้าประตูถึงสถานีปลายทาง 2. การปรับเวลาล่าช้าเป็นขั้นเป็นตอนจากสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทาง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ความว่า ยิ่งมีผู้โดยสารเปลี่ยนถ่ายมากเท่าไรก็จะให้เกิดความล่าช้าเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มเวลาเดินทางที่มากกว่าความเป็นจริงในการเดินรถนั้นสามารถลดความล่าช้า และลดค่าใช้จ่ายได้ การมีขบวนรถมากเท่าไรก็จะทำให้ล่าช้าเพิ่มมากขึ้น

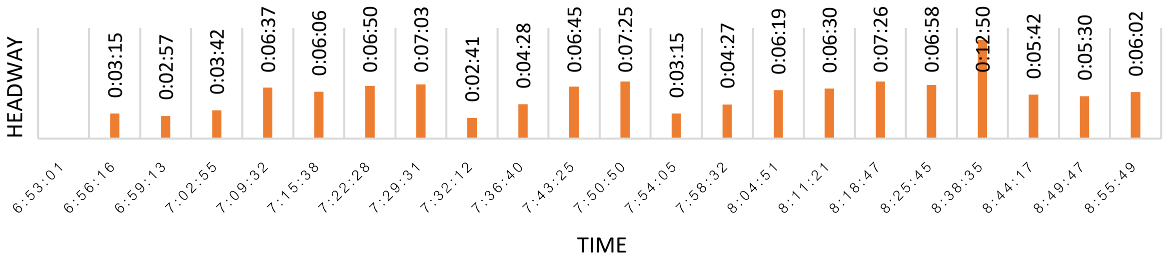


Figure 1 Headway of Blue Line SB in Morning Peak Hours, 26 Aug 2019, 7.00 A.M. – 09.00 A.M.

กราฟแสดงความถี่ของขบวนรถ เส้นตัวอย่างที่วัด (Sample) คิดเป็น 100% กับ เส้นตามตารางเดินรถ (Timetable) จะเห็นว่ามีหลายช่วงที่ความถี่ของขบวนรถมาเร็วกว่าตาราง ตามตาราง และช้ากว่าตาราง ผลคือมีความคลาดเคลื่อน -61% - 84% จาก Timetable ซึ่งการทำให้ความถี่ตามตัวอย่างที่วัดไม่มีการล่าช้าเกินกว่าตารางเดินรถจะต้องลดค่าลงเหลือ 55% แต่จะส่งผลให้ความถี่บางช่วงต่ำกว่า 2 นาที (Sangphong and Ratanavaraha, 2017) ได้อธิบายไว้ว่า กรณีระบบ Fixed block ระยะรถไฟที่ให้บริการที่วิ่งด้วยความเร็วเท่ากันบนบล๊อครางรถไฟที่ไม่เท่ากันโดยบล๊อครางรถไฟที่ยาวที่สุด คือ ระยะห่างระหว่างขบวน (Headway) ที่จะทำได้ต่ำที่สุด ซึ่งในระบบรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินมีสามารถรองรับความถี่ของขบวนรถได้ 2 นาที/ขบวน

ทำให้เกิดขึ้นไม่ได้จริง ค่าที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดและส่งผลดีที่สุดคือ 75% จากผลการวัดทดลอง ซึ่งจะมีความถี่ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4-5 นาที แสดงดังรูปที่ 2 (Figure 2)

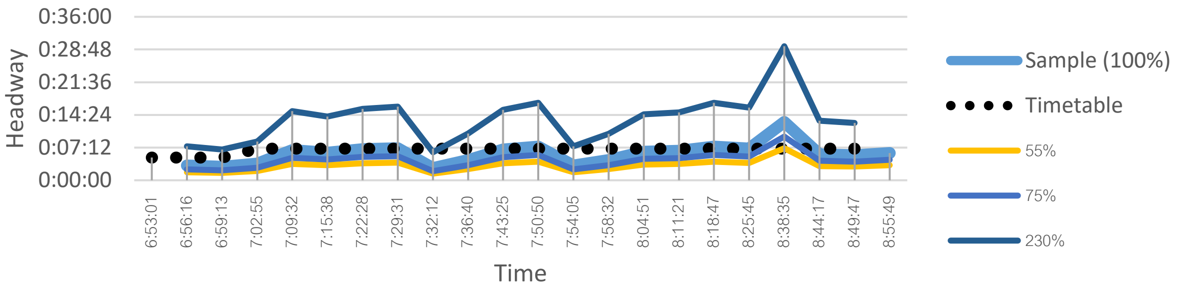


Figure 2 Headway of Blue Line in morning peak hours (under various conditions), 26 Aug 2019.

Eldeeb (2018) ได้แบ่งพื้นที่การหมุนเวียนของผู้โดยสารเป็นพื้นที่ความปลอดภัย (Safety zone) พื้นที่รอคอย (Waiting zone) พื้นที่ผู้โดยสารหมุนเวียนหรือผ่านเพื่อสัญจรต่อ (Circulating zone) พื้นที่เก็บอุปกรณ์ด้านความปลอดภัย เช่น อุปกรณ์ช่วยเหลือ อุปกรณ์ตัดไฟ (Equipment zone) โดยกำหนดระยะ ดังภาพที่ 3 (Figure 3)

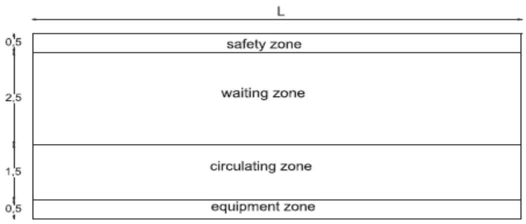


Figure 3 The Divide of zone in platform.

การวัดปริมาณเส้นผู้โดยสารที่ตกค้างช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า จะแบ่งออกเป็น 5 ระดับ รายละเอียดแสดงด้านล่าง และดังรูปที่ 4 (Figure 4)

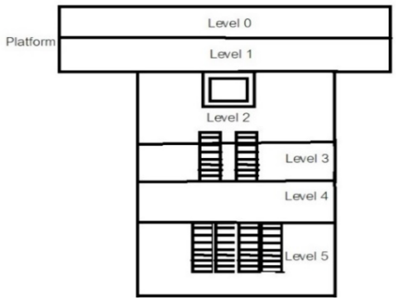


Figure 4 Level of Density in Tao Poon Station.

ระยะปลอดภัย (Safety zone) จะอยู่ห่างจากชานชาลา 0.5 ม. ซึ่งถูกกั้นด้วยประตูกั้นชานชาลา และเส้นเหลือง ระยะรอคอย (Waiting zone) ในชานชาลาจะอยู่ที่ Level 1 และอาจเลยมาถึง Level 2-3 ได้ แต่ Level 4-5 ควรเป็นระยะหมุนเวียน (Circulating zone) เพื่อให้ผู้โดยสารสามารถสัญจรเพื่อเปลี่ยนขบวนรถหรือสัญจรออกจากสถานีได้สะดวก ซึ่งในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าหรือช่วงที่เกิดปัญหารถไฟฟ้า สายสีน้ำเงินขัดข้อง โดยอาจจะต้องมีการใช้พื้นที่ถึง Level 4-5 เพื่อให้ผู้โดยสารรอคอยขบวนรถ สายสีน้ำเงิน

ระดับ 0 ผู้โดยสารตกค้างอยู่ประมาณครึ่งชานชาลา สามารถขึ้นได้ใน 1 ขบวนรถ

ระดับ 1 ผู้โดยสารตกค้างอยู่ประมาณเต็มชานชาลา สามารถขึ้นได้ใน 1 ขบวนรถ

ระดับ 2 ผู้โดยสารตกค้างอยู่ประมาณเต็มชานชาลา และพื้นที่สัญจรไม่เกิน 1/5 ส่วน สามารถขึ้นได้ใน 2 ขบวน

ระดับ 3 ผู้โดยสารตกค้างอยู่ประมาณเต็มชานชาลา และพื้นที่สัญจรไม่เกิน 2/5 ส่วน สามารถขึ้นได้ใน 2 ขบวน

รถระดับ 4 ผู้โดยสารตกค้างอยู่ประมาณเต็มชานชาลา และพื้นที่สัญจรไม่เกิน 3/5 ส่วน สามารถขึ้นได้ใน 3 ขบวน

รถระดับ 5 ผู้โดยสารตกค้างอยู่ประมาณเต็มชานชาลา และพื้นที่สัญจรมากกว่า 3/5 ส่วน สามารถขึ้นได้ในอย่างน้อย 3 ขบวนรถ จนถึงเต็มความจุของชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงิน โดยระดับ 0-1 เป็นสภาวะปกติ ระดับ 2-3 เป็นสภาวะหนาแน่น ระดับ 4-5 เป็นสภาวะหนาแน่นมาก

เส้นปริมาณเฉลี่ย และเส้นของความสามารถของความจุขบวนรถสายเฉลิมรัชมงคล ซึ่งจะเห็นว่าเส้นปริมาณผู้โดยสารจะสูงกว่าความสามารถในการรองรับผู้โดยสารของขบวนรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลใน 1 ขบวน

โดยประมาณ 300 คน ซึ่งจะส่งผลให้มีผู้โดยสารตกค้างอยู่บนชั้นชานชาลาไม่สามารถระบายได้ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ดังรูปที่ 5 (Figure 5)

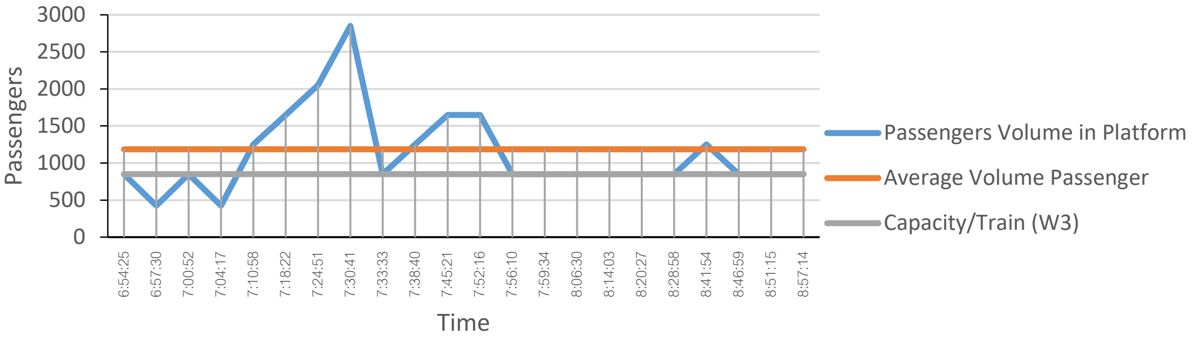


Figure 5 Passenger volume in morning peak hours at Tao Poon station Blue Line SB platform, 7 June 2019.

การวัดปริมาณผู้โดยสารชั้นชานชาลา สายสีน้ำเงิน สถานีเตาปูน ช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า โดยความจุสูงสุดของชั้นชานชาลา สายสีน้ำเงิน สถานีเตาปูน ฝั่งขาล่อง (ไปหลักสอง) อยู่ที่ 2,850 คน

ซึ่งในเส้นตัวอย่างที่วัด (Sample) จะที่มีช่วงเวลา 7:29 – 7:32 น. ซึ่งมีความถี่ขบวนรถช่วงนี้อยู่ที่ 7:03 จะมีปริมาณผู้โดยสารใกล้เต็มความจุของชั้นชานชาลา สายสีน้ำเงิน สถานีเตาปูน ฝั่ง SB ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ผู้โดยสารเกินความจุของชั้นชานชาลา สายสีน้ำเงิน สถานีเตาปูน ฝั่งขาล่อง จะต้องป้องกันไม่ให้เกิดความถี่ของขบวนรถเกิน 7 นาทีต่อขบวน ในช่วงที่มีผู้โดยสารสูงสุด ภายใต้เงื่อนไขจำนวนผู้โดยสารใช้บริการในปัจจุบัน เส้นตามตารางเวลา (Timetable) คือ ปริมาณผู้โดยสารบนชั้นชานชาลาถ้าวิ่งตรงตามตารางเวลา ซึ่งจะเห็นว่ามีบางช่วงตัวอย่างที่วัดกับตามตารางมากกว่าและน้อยกว่า แต่ช่วงปัญหาที่ตรงกันคือ ช่วงเวลา 7:29 – 7:32 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ปริมาณผู้โดยสารบนสถานีเตาปูนมีมากที่สุด เส้นตามตารางการเดินรถตามสัญญา (5 min) คือ ความถี่ขบวนรถ 5 นาทีต่อขบวน ซึ่งจะทำให้ปริมาณผู้โดยสารไม่เต็มความจุของชั้นชานชาลาสายเฉลิมรัชมงคล เส้นความถี่ 2 นาที (2 min) คือ ความสามารถสูงสุดในการออกแบบระบบรถไฟฟ้า ให้มีความถี่ขบวนรถ 2 นาทีต่อขบวน ดังรูปที่ 6 (Figure 6)

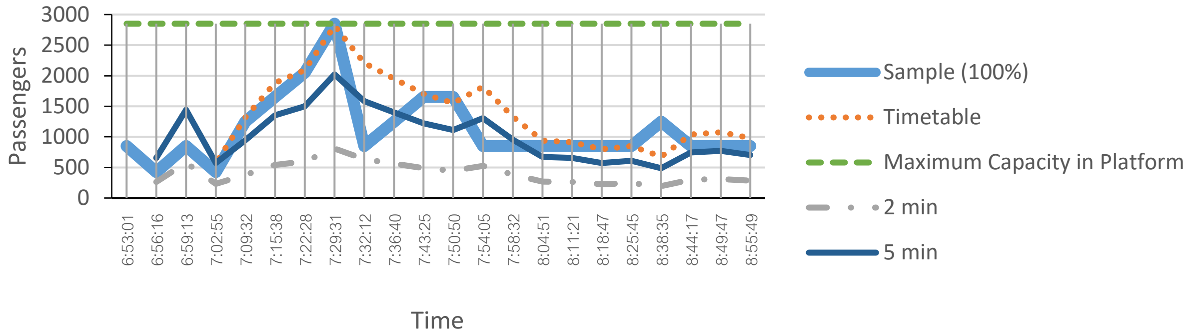


Figure 6 Volume Passengers at Tao Poon Station Blue Line SB Platform in Morning Peak Hours and Calulate under Condition, 7 Jun 2019.

สรุป

การศึกษาผู้โดยสารเพื่อการเปลี่ยนในครั้งนี้แสดงถึงความสามารถในการรองรับของชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงินของสถานีเตาปูนภายใต้เงื่อนไขต่างๆในสภาวะปกติ ความถี่ที่เหมาะสมที่สามารถรองรับปริมาณผู้โดยสารตัวอย่างจากสายสีม่วง และจากสถานีเตาปูนในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า ทั้งนี้ปริมาณผู้โดยสารอาจเปลี่ยนไปถ้าเกิดจากเนื่องจากความล่าช้าจากระบบรถไฟฟ้า พฤติกรรมของผู้โดยสาร ระบบขนส่งมวลชนอื่น สภาพอากาศ สภาพการจราจร หรือ ปัจจัยภายนอกที่เปลี่ยนไป ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงการเดินรถให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดความแออัดภายในสถานี ทำให้เดินทางความสะดวกสบาย ตรงต่อเวลาและเวลารอคอยต่ำ ถ้าเดินรถด้วยระยะห่างระหว่างขบวนได้ ไม่เกิน 5 นาที โดยเพิ่มขบวนรถ และภายใต้ปัจจัยสถานีเตาปูนเป็นสถานีต้นทาง ปริมาณผู้โดยสารดังตัวอย่างจะไม่เกิดปริมาณผู้โดยสารเต็มชั้นชานชาลาสายสีน้ำเงิน แต่ในอนาคตจะมีการเปิดส่วนต่อขยายจะต้องมีการศึกษาปริมาณผู้โดยสารเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณผู้โดยสารได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตลอดจนคณาจารย์ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะในการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

เอกสารอ้างอิง

Eldeeb, M.M., A.S. Qotb, H.S. Riad and A.M. Ashour. 2018. Optimal operation interaction (passenger/train/platform) for greater cairo underground metro (gcum) 1st and 2nd line. **Ain Shams Engineering Journal** 9(4): 3067-3076.

Goverde. 2005. **Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis.** Netherlands Research School for Transport.

Sangphong, O., S. Siridhara and V. Ratanavaraha. 2017. Determining critical rail line blocks and minimum train headways for equal and unequal block lengths and various train speed scenarios. **Engineering Journal** 21(3). https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.3.281.

Seriani, S. 2018. **Crowd Management on Metro Station Platforms.** Doctor of Philosophy. Centre for Transport Studies University College London.

Sirikijpanichkul, A. 2018. **Railway Operation Concept 1-4.** KURAIL, Kasetsart University.

Vuchic, R. 2005. **Urban Transit.** John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Xiaojuan, L. and H.B. Zhang Qi. 2013. Delay adjustment method at transfer station of high-speed railway. **Advance in Mechanical Engineering**. 1-12. https://doi.org/10.1155/2013/752632.

Zoccali, P., G. Loprencipe and R.C. Lupascu. 2017. Acceleration measurements inside vehicles: passenger, comfort mapping on railways. Measurement 129: 489-498. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.079.

การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากถั่วเหลือง

An Experimental Study of Spontaneous Ignition of Soybean Meal

มนตรี เมธาวินวิวัฒน์[1] และ ณัฐศักดิ์ บุญมี[2*]

Montri Matawinwiwat[1] and Nathasak Boonmee[2*]

บทคัดย่อ

การลุกไหม้ได้เองของกากถั่วเหลืองสามารถเกิดขึ้นได้ภายในไซโลที่มีขนาดใหญ่และสามารถพัฒนาขึ้นเป็นเปลวไฟจนเป็นเหตุของการเกิดเพลิงไหม้ได้ จึงได้มีการศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากถั่วเหลือง บทความนี้นำเสนอวิธีการกำหนดขนาดที่ปลอดภัยจากการเกิดการลุกไหม้ได้เองสำหรับไซโลเก็บกากถั่วเหลืองที่มีขนาดใหญ่ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือพลังงานกระตุ้น (E) และ Pre-exponential factor ($A\Delta h_c/k$) โดยหาได้จากการทดลอง จากสองวิธีที่ชื่อว่า วิธี Frank-Kamenetskii และวิธีจุดตัดอุณหภูมิ ค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากการทดลองคือ 86.3 kJ/mol (Frank-Kamenetskii) และ 91.8 kJ/mol (จุดตัดอุณหภูมิ) สามารถประมาณขนาดที่ปลอดภัยสำหรับการจัดเก็บไซโลรูปทรงกระบอกขนาดใหญ่ โดยความสูงในการจัดเก็บสูงสุดที่จะไม่เกิดการลุกไหม้ได้เองคือ 3.8 เมตร, 3.0 เมตร และ 2.4 เมตร สำหรับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 40°C, 45°C และ 50°C ตามลำดับ

ABSTRACT

Spontaneous ignition of soybean meal can promote self-ignition inside a large silo storage and eventually the spontaneous ignition process may develop to a flaming fire. Therefore a series of experiments of spontaneous ignition of soybean have been carried out. This paper presents a method to determine a safe size for a large silo storage of soybean meal from spontaneous ignition. The relevant kinetic parameters which are the activation energy (E) and the apparent pre-exponential factor ($A\Delta h_c/k$) were determined from experiment. Two methods namely the Frank-Kamenetskii and the crossing point. The activation energies experimentally determined were 86.3 kJ/mol (Frank-Kamenetskii) and 91.8 kJ/mol (Crossing point). The large cylinder shape silo storage safe sizes have been estimated, the maximum storage height that spontaneous ignition does not occur shall be 3.8 m, 3.0 m and 2.4 m for the surrounding temperatures of 40°C, 45°C and 50°C respectively.

Key words: soybean meal, spontaneous ignition, safe storage size

* Corresponding author; e-mail address: fengnab@ku.ac.th

[1]หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

อุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์นิยมใช้กากถั่วเหลืองซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสกัดน้ำมันถั่วเหลืองมาเป็นวัตถุดิบสำหรับอาหารสัตว์ เนื่องจากกากถั่วเหลืองมีโปรตีนสูง สามารถผลิตได้ง่าย และรวดเร็วจึงทำให้มีปริมาณมากและราคาไม่สูง การจัดเก็บกากถั่วเหลืองภายในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ส่วนใหญ่ไม่นิยมเก็บแบบเทกอง (Bulk size) เพราะต้องใช้พื้นที่มากในการจัดเก็บในขณะที่โรงงานมีพื้นที่จำกัด แต่จะนิยมเก็บในไซโลโดยควบคุมให้มีปริมาณเพียงพอต่อการผลิตในช่วงระยะเวลาหนึ่งและยังสามารถนำวัตถุดิบเข้ากระบวนการผลิตได้อย่างสะดวก ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจัดเก็บกากถั่วเหลืองในไซโลคือการเกิดการระอุขึ้นภายในจนกลายเป็นเพลิงไหม้ เนื่องจากถั่วเหลืองเกิดปฏิกิริยาเคมีคายความร้อนด้วยตัวเอง (Self-heating) จนเกิดการลุกไหม้ได้ด้วยตัวเอง ตัวอย่างกรณีเกิดเหตุเพลิงไหม้ไซโลเก็บถั่วเหลืองในประเทศกัมพูชา มูลค่าความเสียหายประมาณ 20 ล้านบาท (ไทยรัฐ, 2552) เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากถั่วเหลืองซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงจากการเกิดเพลิงไหม้

การลุกไหม้ได้เองของกากถั่วเหลืองมีหลายปัจจัย ผู้วิจัยมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยเฉพาะด้านขนาด และอุณหภูมิซึ่งมีผลต่อการลุกไหม้ได้เองของกากถั่วเหลือง โดยใช้ทฤษฎีของ Frank-Kamenetskii (Frank, 1969) และวิธีจุดตัดอุณหภูมิในการวิเคราะห์ (ณัฐศักดิ์, 2560) ซึ่งในอดีตมีนักวิจัยทำการศึกษาการลุกไหม้ได้เองโดยใช้ทฤษฎีของ Frank-Kamenetskii ในการวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น การลุกไหม้ได้เองของกองกากอ้อยในประเทศไทย (Nathasak and Pongsak, 2017) การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากอ้อย (พงษ์ศักดิ์, 2558) การศึกษาเชิงทดลองการจุดติดไฟแบบสพอนเทเนียสของขี้เลื่อย (เบญจมาศ, 2558) การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของแกลบข้าว (เพ็ญอาภา, 2559)

ทฤษฎีการลุกไหม้ได้เอง

การวิเคราะห์การลุกไหม้ได้เองใช้วิธีของ Frank-Kamenetskii (Frank, 1969) จะใช้ตัวเลข Damkohler (δ) ซึ่งตัวเลขนี้หมายถึง อัตราส่วนระหว่างพลังงานเคมีเนื่องจากการเผาไหม้ต่อพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากการนำความร้อน โดยค่าตัวเลข Damkohler (δ) มีค่าตามสมการที่ (1)

$$\delta = \left(\frac{E}{\bar{R}T_\infty}\right)\left[\frac{r_o^2\left(A\Delta h_c\right)e^{-\frac{E}{\bar{R}T_\infty}}}{kT_\infty}\right] \qquad (1)$$

โดยที่ E คือ พลังงานกระตุ้น, $\bar{R}$ คือ ค่านิจคงที่ของแก๊ส, T_∞ คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, A คือ Pre-exponent factor, Δh_c คือ ความร้อนของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง, k คือ สภาพการนำความร้อนของเชื้อเพลิง และ r_o คือ ขนาด (ณัฐศักดิ์, 2560; James G. Quintiere, 2006)

จากสมการที่ (1) นำมาจัดรูปใหม่และใส่ค่าล็อคทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการที่ (2)

$$\ln\left[\delta_c\left(\frac{T_{ig}^2}{r_o^2}\right)\right] = -\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)\frac{1}{T_{ig}} + \ln\left[\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)\left(\frac{A\Delta h_c}{k}\right)\right] \qquad (2)$$

เทียบสมการที่ (2) กับสมการเส้นตรง $y = m_1x + c_1$ เมื่อ m_1 คือความชัน และ c_1 คือจุดตัดแกน y โดยกำหนดให้ $y = \ln\left[\delta_c \frac{T_{ig}^2}{r_o^2}\right]$, $m_1 = -\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)$, $x = \frac{1}{T_{ig}}$ และ $c_1 = \ln\left[\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)\left(\frac{A\Delta h_c}{k}\right)\right]$ จะเห็นว่า $\ln\left[\delta_c \frac{T_{ig}^2}{r_o^2}\right]$ มี

ความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ $\frac{1}{T_{ig}}$ ถ้าพล๊อตกราฟเส้นตรงระหว่างตัวแปรทั้งสอง ความชันของกราฟจะให้ค่า $E/\bar{R}$ และค่าจุดตัดแกน y จะให้ค่า c_1 นำค่าทั้ง 2 แทนลงในสมการจุดตัดแกน y (c_1) จะสามารถคำนวณหาค่า $A\Delta h_c/k$ ของเชื้อเพลิงได้ นำมาคำนวณหาค่า Damkohler (δ) เพื่อไปเปรียบเทียบกับค่า Damkohler วิกฤติ (δ_c) หากค่า δ สูงเกินกว่าค่า δ_c แสดงว่าเชื้อเพลิงดังกล่าวสามารถเกิดการลุกไหม้ได้ด้วยตัวเอง ที่สภาวะการพาความร้อนที่ผิวเชื้อเพลิงมีค่ามาก ($Bi \longrightarrow \infty$) ตัวเลข Damkohler วิกฤตจะมีค่าขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของก้อนเชื้อเพลิงเท่านั้น ในกรณีของก้อนเชื้อแพลิงรูปทรงกระบอกที่มีรัศมี r_o และครึ่งหนึ่งของความสูง l_o เท่ากันค่า Damkohler วิกฤติมีค่าเท่ากับ 2.84 โดยคำนวณมาจากสมการที่ (3)

$$\delta_c = 2.0+0.841\left(\frac{r_o}{l_o}\right)^2 \quad (3)$$

วิธีการคำนวณหาค่า $E/\bar{R}$ จากการทดลองมี 2 วิธีคือ

1 .วิธีของ Frank-Kamenetskii

ดังการวิเคราะห์การลุกไหม้ได้เองของ Frank-Kamenetskii ข้างต้นทำให้ได้ค่า $E/\bar{R}$ และค่า $A\Delta h_c/k$ ซึ่งจะต้องหาค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เองที่ต่ำที่สุดของเชื้อเพลิงที่ทดลองในแต่ละภาชนะบรรจุรูปทรงกระบอกที่มีขนาดแตกต่างกันมากกว่าหนึ่งขนาด ทำให้ต้องทำการทดลองแบบลองผิดลองถูกหลายครั้งและใช้เวลาหลายชั่วโมงในแต่ละครั้ง

2 .วิธีจุดตัดอุณหภูมิ (Crossing point)

เพื่อแก้ปัญหาที่จะต้องทำการทดลองหลายครั้ง Jones *et al.*(1996; 1998) ได้เสนอทางเลือกในการหาค่า $E/\bar{R}$ ของเชื้อเพลิงจากการทดลองด้วยวิธีจุดตัดอุณหภูมิ พิจารณาที่อุณหภูมิกึ่งกลาง (T_o) ตัดกับอุณหภูมิตู้อบ (T_∞) โดยเมื่อจุดที่อุณหภูมิตัดกันจะพบค่าแกร์เดียนของอุณหภูมิภายในเนื้อวัตถุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (∇T = 0) ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานของชิ้นทดสอบเมื่อ dT/dx = 0 ที่จุดตัดอุณหภูมิจะลดรูปดังสมการที่ (4) ซึ่งในทุกๆการทดลองจะพบจุดตัดอุณหภูมิเสมอไม่ว่าอุณหภูมิของตู้อบ (T_∞) จะเท่าหรือไม่เท่ากับค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เอง (T_{ig}) ก็ตาม

$$\rho c_p \left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{CP} = \dot{Q}_R''' = Ae^{\frac{-E}{\bar{R}T_{CP}}}\Delta h_c \quad (4)$$

เมื่อตัวห้อย CP หมายถึงค่าของตัวแปรที่จุดตัดอุณหภูมิ (Crossing point)

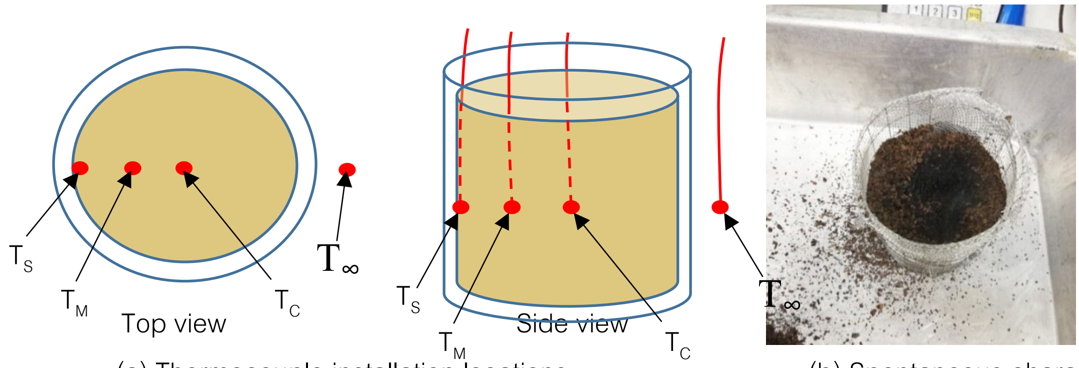
จากสมการที่ (4) นำมาจัดรูปใหม่และใส่ค่าล็อคทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการที่ (5)

$$\ln\left[\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{CP}\right] = -\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)\frac{1}{T_{CP}} + \ln\left[\frac{A\Delta h_c}{\rho c_p}\right] \quad (5)$$

เทียบสมการที่ (5) กับสมการเส้นตรง $y = m_2x + c_2$ เมื่อ m_2 คือความชัน และ c_2 คือจุดตัดแกน y โดยกำหนดให้ $y = \ln\left[\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{CP}\right]$, $m_2 = -\left(\frac{E}{\bar{R}}\right)$, $x = \frac{1}{T_{CP}}$ และ $c_2 = \ln\left[\frac{A\Delta h_c}{\rho c_p}\right]$ จะเห็นว่า $\ln\left[\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{CP}\right]$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ $\frac{1}{T_{CP}}$ ถ้าพล็อตกราฟเส้นตรงระหว่างตัวแปรทั้งสอง ความชันของกราฟจะให้ค่า $E/\bar{R}$ เช่นเดียวกันกับวิธีของ Frank-Kamenetskii และสามารถหาค่าได้ในทุกๆอุณหภูมิของตู้อบ (T_∞) และทุกๆขนาดของชิ้นทดสอบที่ทำการทดลอง

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองหาอุณหภูมิการลุกไหม้ได้เองของกากถั่วเหลือง ดำเนินการโดยเริ่มจากเก็บตัวอย่างจากกองกากถั่วเหลืองเพื่อใช้เป็นชิ้นทดสอบ กำหนดภาชนะบรรจุ (Basket) รูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับความสูงขนาด 5.5, 7.0 และ 8.0 เซนติเมตร และติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ Thermocouple จำนวน 4 จุด ได้แก่ที่กึ่งกลางของชิ้นทดสอบ (T_C = Center temperature) ระหว่างกึ่งกลางของชิ้นทดสอบกับผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ (T_M = Midpoint temperature) ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ (T_S = Surface temperature) และภายในตู้อบ (T_∞ = Oven temperature) ตาม Figure 1 (a) จากนั้นนำกากถั่วเหลืองใส่ภาชนะที่กำหนด นำภาชนะบรรจุกากถั่วเหลืองชั่งน้ำหนักแล้วนำเข้าตู้อบ ตั้งค่าตู้อบให้ทำงานตามอุณหภูมิที่กำหนด (ปรับอุณหภูมิครั้งละ 1.0°C(โดยวิธีลองผิดลองถูก เพื่อหาค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_∞) ณ.จุดที่ทำให้อุณหภูมิกึ่งกลางของชิ้นทดสอบมีค่ามากกว่าอุณหภูมิผิวของชิ้นทดสอบและเกิดการลุกไหม้ได้เอง (T_{ig})



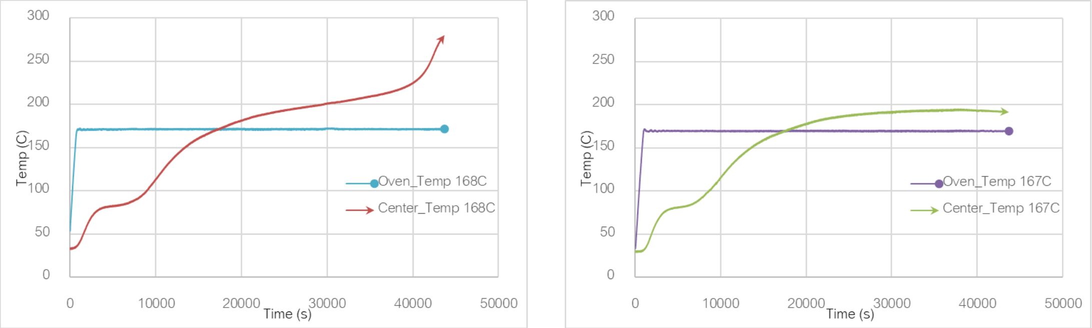
(a) Thermocouple installation locations (b) Spontaneous characteristics

Figure 1 Experiment setup and sample after test.

ผลและวิจารณ์

เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าเพียงพอที่จะทำให้อุณหภูมิกึ่งกลางมีค่ามากกว่าอุณหภูมิผิวของชิ้นทดสอบจนเกิดการลุกไหม้ได้เองจะเป็นการลุกไหม้ที่เริ่มจากจุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบและขยายวงกว้างออกไปสู่ด้านผิวของชิ้นทดสอบ การลุกไหม้ทำให้เนื้อของกากถั่วเหลืองเปลี่ยนเป็นสีดำเนื่องจากเกิดกระบวนการไพโรไลซิส และปฏิกิริยาเคมีคายความร้อนออกมาตาม Figure1 (b)

ผลการทดลองของชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกขนาด 8.0 เซนติเมตร พบว่าอุณหภูมิตู้อบที่ทำให้อุณหภูมิกึ่งกลางมีค่ามากกว่าอุณหภูมิผิวจนเกิดการลุกไหม้ได้เอง (T_{ig}) คือ 168°C ส่วนอุณหภูมิตู้อบที่ 167°C ไม่เกิดการลุกไหม้ได้เอง ดัง Figure 2 (มีการทดลองซ้ำที่ 167°C เพื่อยืนยันอุณหภูมิที่ไม่เกิดการลุกไหม้ได้เอง) สำหรับผลการทดลองในภาชนะบรรจุขนาด 5.5 และ 7.0 เซนติเมตร ได้ค่า T_{ig} คือ 184°C และ 174°C ตามลำดับ เมื่อภาชนะบรรจุมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ระยะทางในการนำความร้อนจากอุณหภูมิกึ่งกลางไปสู่ขอบของภาชนะมากขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการนำความร้อนลดลงเกิดการสะสมความร้อนที่จุดกึ่งกลางมากขึ้น จึงทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่าภาชนะบรรจุที่มีขนาดเล็ก



(a) Temperature causes spontaneous ignitions (b) Temperature does not cause spontaneous ignitions

Figure 2 Ignition temperature of cylinder shape container size 8 cm.

วิธีของ Frank-Kamenetskii เพื่อหาค่า $E/\bar{R}$ และค่า $A\Delta h_c/k$

นำค่า T_{ig} ที่ได้จากการทดลองในแต่ละขนาดภาชนะบรรจุมาคำนวณค่าแกน $y = \ln\left[\delta_c \frac{T_{ig}^2}{r_o^2}\right]$ และแกน $x = \frac{1}{T_{ig}}$ จะได้กราฟเส้นตรงตาม Figure 3 สมการเส้นตรงคือ y = -10377x + 43.182 จะได้ความชันของกราฟคือ $E/\bar{R}$ = 10377 K และ $A\Delta h_c/k = 5.47\times10^{14}$ K/m^2 แทนค่า $E/\bar{R}$ และ $A\Delta h_c/k$ ลงในสมการที่ (1) จะได้ค่าตัวเลข δ ดังสมการที่ (6)

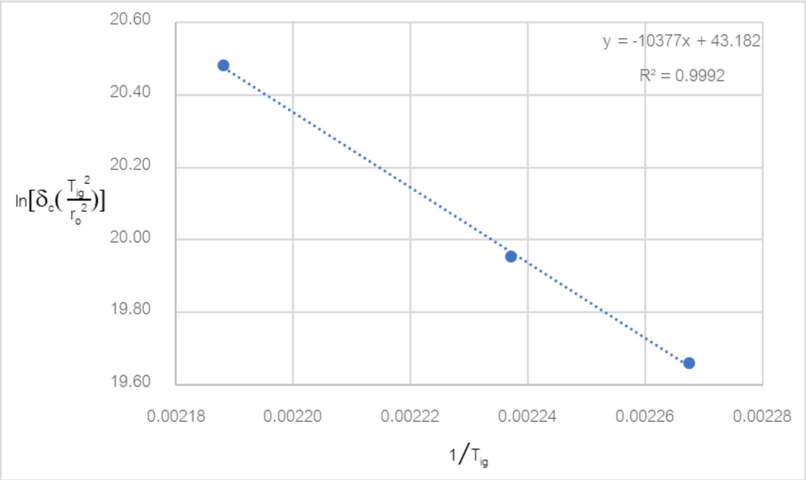


Figure 3 A liner plot of $y = \ln\left[\delta_c \frac{T_{ig}^2}{r_o^2}\right]$ vs $x = \frac{1}{T_{ig}}$

$$\delta = 5.676\times10^{18}\left(\frac{r_0^2}{T_\infty^2}\right)e^{-10377/T_\infty} \qquad (6)$$

วิธีจุดตัดอุณหภูมิเพื่อหาค่า $E/\bar{R}$

นำค่าความชันที่จุดตัดกันของอุณหภูมิกึ่งกลาง $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\bigg|_{CP}\right)$ กับทุกๆอุณหภูมิของตู้อบ (T_∞) และทุกๆขนาดของชิ้นทดสอบที่ทำการทดลองมาคำนวณค่าแกน $y = \ln\left[\frac{\partial T}{\partial t}\bigg|_{CP}\right]$ และแกน $x = \frac{1}{T_{CP}}$ จะได้กราฟเส้นตรงตาม Figure 4 สมการเส้นตรงคือ y = -11039x + 19.522 จะได้ความชันของกราฟคือ $E/\bar{R}$ = 11039 K

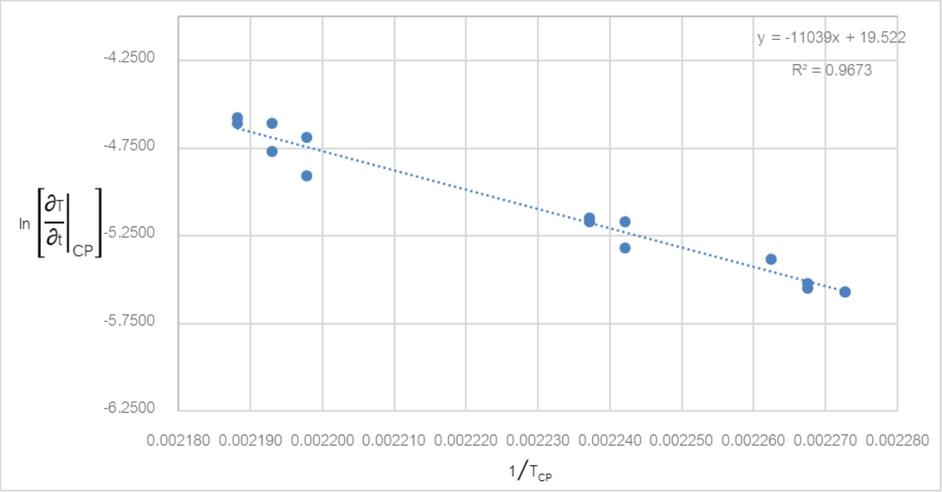


Figure 4 A liner plot of y = $\left[\frac{\partial T}{\partial t}\Big|_{CP}\right]$ vs x = $\frac{1}{T_{CP}}$

เปรียบเทียบค่า E (Activation Energy) ของทั้ง 2 วิธี

ค่า E ซึ่งเป็นค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำที่สุดที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้ได้ด้วยตัวเองของเชื้อเพลิง ที่ได้จากวิธีของ Frank-Kamenetskii เท่ากับ 86.3 kJ/mol และจากวิธีจุดตัดอุณหภูมิ (Crossing point) เท่ากับ 91.8 kJ/mol พบว่ามีค่าแตกต่างกันประมาณ 6.4% ความแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ Thermocouple ที่จุดกึ่งกลางไม่ตรงกันในแต่ละครั้งการทดลอง ทำให้จุดตัดอุณหภูมิเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น

การประมาณการจัดเก็บกากถั่วเหลืองในไซโลที่ปลอดภัย

โดยปกติการจัดเก็บกากถั่วเหลืองจะเก็บในไซโลรูปทรงกระบอกตาม Figure 5 และจากผลการวิเคราะห์ข้างต้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาขนาดของไซโลสำหรับจัดเก็บกากถั่วเหลืองที่ปลอดภัยได้

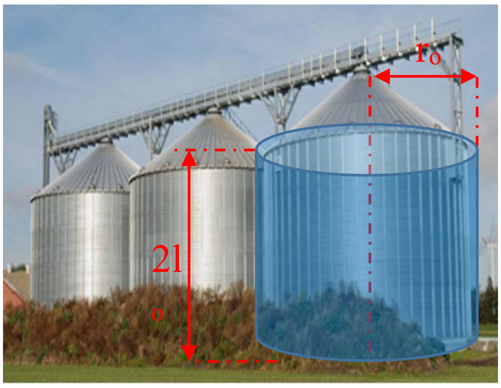


Figure 5 Silo in cylinder shapes.

จากเงื่อนไขการลุกไหม้ได้ด้วยตัวเองของเชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นเมื่อค่า δ สูงกว่าค่า δ_c นำค่า δ ดังสมการที่ (6) มาเท่ากับค่า δ_c ของรูปทรงกระบอกดังสมการที่ (3) จะได้สมการที่ (7) ซึ่งทำให้สามารถหาสภาวะวิกฤติของ r_o, l_o และ T_∞ ได้ ทำให้สามารถหาผลเฉลยของสมการนี้ได้ตาม Figure6

$$5.676x10^{18}\left(\frac{r_0^2}{T_\infty^2}\right)e^{-10377/T_\infty} = 2.0+0.841\left(\frac{r_o}{l_o}\right)^2 \quad (7)$$

จาก Figure 6 คือผลเฉลยของความสัมพันธ์ของรัศมีและครึ่งหนึ่งของความสูงของกากถั่วเหลืองรูปทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 40°C, 45°C และ 50°C โดยพื้นที่ใต้กราฟคือบริเวณขนาดของไซโลที่ปลอดภัยที่จะไม่เกิด

การลุกไหม้ได้เองของอุณหภูมินั้นๆ ซึ่งจากตัวอย่างกากถั่วเหลืองที่นำมาทดลองเป็นกากถั่วเหลืองจากโรงงานผลิตอาหารสัตว์แห่งหนึ่ง ความสูงในการจัดเก็บสูงสุดที่จะไม่เกิดการลุกไหม้ได้เองคือ 3.8 เมตร, 3.0 เมตร และ 2.4 เมตร สำหรับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 40°C, 45°C และ 50°C ตามลำดับ

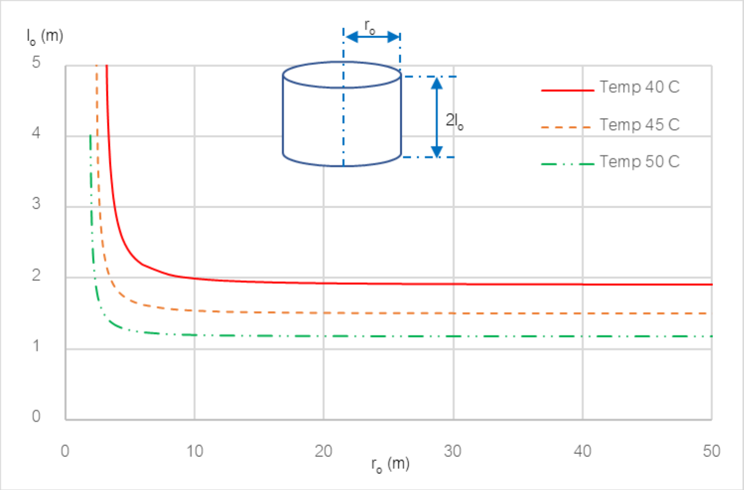


Figure 6 Safety curve plot based on a cylinder shape of soybean meal stockpile.

สรุป

การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากถั่วเหลือง เพื่อหาคุณสมบัติการลุกไหม้ได้เองโดยใช้ทฤษฎีของ Frank-Kamenetskii และวิธีจุดตัดอุณหภูมิในการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยบรรจุกากถั่วเหลืองในภาชนะรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับความสูงขนาด 5.5, 7.0 และ 8.0 เซนติเมตร และควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบตามที่กำหนดเพื่อหาอุณหภูมิตู้อบที่น้อยที่สุดที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้ได้เอง ได้ค่า $E/\overline{R}$ เท่ากับ 10377 K และค่า $A\Delta h_C/k$ เท่ากับ $547.x10^{14}$ K/m^2 นำมาประมาณค่าขนาดของไซโลในการจัดเก็บกากถั่วเหลืองที่ปลอดภัยไม่เกิดอัคคีภัยที่มีสาเหตุมาจากการลุกไหม้ได้เอง โดยใช้ภาพกราฟผลเฉลยของความสัมพันธ์ของรัศมีและครึ่งหนึ่งของความสูงของกากถั่วเหลืองทรงกระบอกที่อุณหภูมิต่างๆ โดยพื้นที่ใต้กราฟคือบริเวณที่ปลอดภัยที่จะไม่เกิดการลุกไหม้ได้เองของอุณหภูมินั้นๆ ซึ่งจากตัวอย่างกากถั่วเหลืองที่นำมาทดลองเป็นกากถั่วเหลืองจากโรงงานผลิตอาหารสัตว์แห่งหนึ่ง ความสูงในการจัดเก็บสูงสุดที่จะไม่เกิดการลุกไหม้ได้เองคือ 3.8 เมตร, 3.0 เมตร และ 2.4 เมตร สำหรับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 40°C, 45°C และ 50°C ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ โครงการวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ตู้อบลมร้อนสำหรับทำการทดลอง และที่สำคัญยิ่งขอขอบพระคุณบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) โรงงานผลิตอาหารสัตว์บกบางนา กม.21 ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนกากถั่วเหลืองที่ใช้ในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมอุตุนิยมวิทยา. **สถิติอุณหภูมิสูงที่สุดในช่วงฤดูร้อนของประเทศไทยระหว่าง พ.ศ. 2494-2561** (Online). https://www.tmd.go.th/programs/uploads/tempstat/max_stat_latest.pdf

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2560. **พลศาสตร์อัคคีภัย.** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ไทยรัฐ. 2552. **ไฟไหม้ไซโลถั่วเหลืองคนไทยฝั่งเขมรวอด 20 ล้าน** (Online). https://www.thairath.co.th/content/43434, 22 ตุลาคม 2552

เบญจมาศ ทองศรี. 2558. **การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของขี้เลื่อย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พงษ์ศักดิ์ พงษ์สัมณะ. 2558. **การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากอ้อย.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เพ็ญอาภา บุญมาดี. 2559. **การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของแกลบข้าว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Frank-Kamenetskii D.A. 1969. **Diffusion and Heat in Chemical Kinetic 2nd edition**. New York, Plenum Press.

James G. Quintiere. 2006. **Fundamentals of Fire Phenomena**. John Wiley & Sons Ltd, England.

J.C. Jones, K.P. Henderson, J. Littlefair and S. Rennie. 1998. Kinetic parameters of oxidation of coals by heat-release measurement and their relevance to self-heating tests. **Fuel** 77: 19-22.

J.C. Jones, P.S. Chiz, R. Koh and J. Matthew. 1996. Kinetic parameter of oxidation of bituminous coals from heat-release rate measurements. **Fuel** 75: 1755-1757.

Nathasak B. and Pongsak P. 2017. Spontaneous ignition of bagasse stockpiles in Thailand. **Engineering Journal** 21: 38-50

การศึกษาเชิงทดลองการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของแกลบ

Spontaneous Ignition of Husk Experiment

พัชรา วะน้ำค้าง[1] และ ณัฐศักดิ์ บุญมี[2*]

Patchara Wanamkang[1] and Nathasak Boonmee[2*]

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอผลการศึกษาเชิงทดลองการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของแกลบ โดยทำการศึกษาค่าจลนศาสตร์การลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของแกลบตามทฤษฎีของ Frank-Kamenetskii มีการทำการทดลองในภาชนะรูปทรงเรขาคณิตที่ต่างกันจำนวน 2 รูปทรง คือ ภาชนะทรงลูกบาศก์ และภาชนะทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับความสูง กำหนดการทดสอบในตัวอย่างขนาด (ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง) เท่ากับ 12, 15, และ 18 เซนติเมตร จากการทดลองได้ค่าจลนศาสตร์ที่มีความเกี่ยวข้อง (ค่าพลังงานกระตุ้น และ pre-exponential factor) อีกทั้งยังในบทความนี้มีการกล่าวถึงผลของความแตกต่างที่เกิดขึ้นในตัวอย่างต่างรูปทรง พร้อมทั้งอธิบายถึงการประมาณการกองเก็บให้ปลอดภัยจากการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสอีกด้วย

ABSTRACT

This paper presents an experimental study of the spontaneous ignition of husk. The kinetic parameters of husk spontaneous ignition were determined experimentally based on the classical spontaneous ignition theory of Frank-Kamenetskii. The experiments were carried out for two geometric shapes: a cubical basket and a cylindrical basket with a diameter equal to its height. The sample sizes (length or diameter) of 12, 15, and 18 cm were employed in the tests. Based on the experimental results, the relevant kinetic parameters (the activation energy and the apparent pre-exponential factor) were determined. The effects of the sample geometrical shape and the safe storage size from spontaneous ignition have been discussed in this work.

Key words: husk, spontaneous Ignition, Ignition of Husk

* Corresponding author; e-mail address: fengnab@ku.ac.th

[1]หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในฐานะที่ประเทศไทยเป็นแหล่งปลูกข้าวที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก โดยมีเนื้อที่สำหรับปลูกข้าวมากถึงประมาณ 114,000 ล้านตารางเมตร ปริมาณผลผลิตประมาณ 32 ล้านตันต่อปี (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2561) วัสดุแหลือทิ้งจากกระบวนการสีข้าวอย่างแกลบ (เปลือกข้าว) จำนวนมากจะถูกกองเก็บไว้เป็นกองขนาดใหญ่เพื่อรอการนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆต่อ แทนการนำไปกำจัด อาทิเช่น ผสมอาหารสัตว์, วัสดุปูพื้นโรงเรือน และปรับปรุงดิน เนื่องจากแกลบอุดมไปด้วยปริมาณสารอินทรีย์ที่มีประโยชน์หลายชนิด แกลบที่เหลือจากกระบวนการสีข้าวนั้นมีมากถึง 0.21 ตัน ต่อตันข้าวสาร แกลบจำนวนมหาศาลเหล่านี้มักถูกกองเก็บไว้แบบง่ายๆซึ่งมีความสี่ยงที่จะเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส (Spontaneous Ignition) นำมาซึ่งความสูญเสียได้ง่ายตามปัจจัยที่มีผลต่อการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส คือ ขนาดของกองเก็บ, ลักษณะความพรุน, ความชื้นและการปนเปื้อน ตัวอย่างเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่มีต้นเพลิงจากกองแกลบที่กองเก็บไว้เป็นกองขนาดใหญ่ในสภาพอากาศร้อน เช่น ไฟไหม้กองแกลบโรงไฟฟ้าใน จ.ร้อยเอ็ด ไทยรัฐออนไลน์, (2559) ไฟไหม้กองแกลบโรงไฟฟ้าชีวมวลใน จ.อยุธยา เดลินิวส์, (2558) และไฟไหม้กองเก็บปุ๋ยใน จ.นครราชสีมา ข่าวสด, (2559) จากตัวอย่างเหตุการณ์เพลิงไหม้ทำให้ผู้วิจัยตระหนักถึงความเสี่ยงในการเกิดอัคคีภัยจากการกองเก็บแกลบอย่างไม่ถูกต้องจึงต้องการจำลองการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของแกลบ เพื่อศึกษาปัจจัยในการเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของกองแกลบและลักษณะการกองเก็บที่ปลอดภัย จะเป็นการช่วยลดความเสี่ยงจากการเกิดอัคคีภัยจากกองเชื้อเพลิงได้

ในอดีตมีนักวิจัยทำการศึกษาการลุกติดไฟได้เองของแกลบตามทฤษฎี Frank-Kamenetskii โดยทำการทดลองตัวอย่างในภาชนะทรงลูกบากศ์ที่มีความยาวด้านเท่ากับ 8, 9 และ 10 เพื่อคำนวณกาการกองเก็บแกลบในลักษณะทรงกระบอกที่ปลอดภัย) Pen-apa, (2016

การศึกษาเชิงทดลองการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสในครั้งนี้ ทำการศึกษาตามวิธีของ Frank-Kamenetskii เพื่อหาค่า Activation Energy ($E/\bar{R}$) และ Pre-Exponential Function ($A\Delta h_c/k$) ของแกลบ ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการลุกติดไฟระหว่างการกองเก็บแกลบเป็นรูปทรงลูกบากศ์และทรงกระบอกพร้อมทั้งหาขนาดการกองเก็บที่ปลอดภัยจากการลุกติดแบบสพอนเทเนียสของแกลบ โดยผลที่คาดว่าจะได้รับจากการทดลองครั้งนี้ คือ ปัจจัยที่มีผลต่อการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของแกลบ และหาลักษณะการกองเก็บแกลบให้เกิดความปลอดภัย เพื่อให้ผู้ที่มีการกองเก็บแกลบทั้งในส่วนที่มีแกลบเป็นวัตถุในกระบวนการและวัสดุพลอยได้จากกระบวนการ ทราบถึงความเสี่ยงของการกองเก็บแกลบที่ดำเนินการอยู่เดิมและเป็นแนวทางในการปรับการกองเก็บแกลบให้อยู่ในลักษณะปลอดภัยจากอัคคีภัย

ทฤษฎีการเกิดลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส

ทฤษฎีของ Frank-Kamenetskii คำนวณหา Activation Energy ($E/\bar{R}$) และ Pre-Exponential Function ($A\Delta h_c/k$) เนื่องจากค่าทั้งสองเป็นคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาด รูปทรง และอุณหภูมิ และสมมติให้อัตราการเผาไหม้เป็นไปตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของอาร์เรเนียส สามารถเขียนสมการของอัตราการคายความร้อนจากการเผาไหม้ได้ คือ

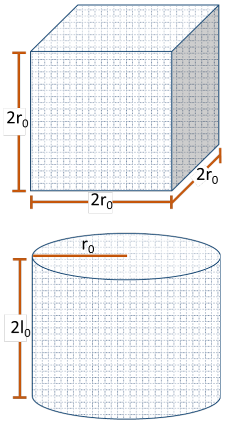
$$\dot{Q}''' = (A\Delta h_c)e^{-\frac{E}{RT}} \qquad (1)$$

เมื่อ $\dot{Q}'''$ คือ อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนจากกระบวนการเผาไหม้ต่อปริมาตร (kW/m^3), A คือ Pre-Exponential factor, Δh_c คือ ความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (kJ/kg), E คือ พลังงานกระตุ้น (J/mole), $\bar{R}$ คือ ค่านิจคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol.K) และ T คือ อุณหภูมิ (K)

ค่า δ) Damkohler Number(แสดงอัตราส่วนระหว่างพลังงานเนื่องจากการเผาไหม้ ต่อพลังงานที่สูญเสียไปจากกระบวนการนำความร้อน โดยค่า δ จะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิแวดล้อม T_∞ เพิ่มขึ้น การคำนวณหาค่า δ เพื่อวิเคราะห์หาความสามารถในการเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) โดยต้องทราบค่า $E/\bar{R}$ และ $A\Delta h_c/k$ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเชื้อเพลิงโดย หาได้จากการทดลองนำเชื้อเพลิงมาควบคุมอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

$$\delta = \left(\frac{E}{\bar{R}T_\infty}\right)\left[\frac{r_0^2(A\Delta h_c)e^{-\frac{E}{\bar{R}T_\infty}}}{kT_\infty}\right] \qquad (2)$$

เมื่อ A คือ Pre-exponent factor, Δh_c คือ ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง, E คือ พลังงานกระตุ้น, $\bar{R}$ คือ ค่านิจคงที่ของแก๊ส, T_∞ คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และ r_0 คือขนาด (James G. Quintiere, 2006) โดยวัตถุจะเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส เมื่อ ค่า δ มีค่ามากกว่า δ_c)Critical Damkohler Number (เนื่องจากมีความร้อนสะสมอยู่ภายในก้อนเชื้อเพลิงทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนนำไปสู่การจุดติดไฟ ซึ่ง δ_c แสดงสภาวะวิกฤตเมื่ออัตราการปล่อยพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีภายในกองเชื้อเพลิงมีค่ามากกว่าอัตราการสูญเสียความร้อนที่ผิวเชื้อเพลิง ขึ้นกับลักษณะรูปทรงของการจัดเก็บเชื้อเพลิง (Robert G. Zalosh, 2002) ดังนี้



ลูกบาศก์ ด้านยาว $2r_0$;

$$\delta_c = 2.52 \qquad (3)$$

เมื่อ r_0 คือ ครึ่งหนึ่งของความยาวด้าน

ทรงกระบอกรัศมี r_0 ยาว $2l_0$

$$\delta_c = 2+0.841\left(\frac{r_0}{l_0}\right)^2 \qquad (4)$$

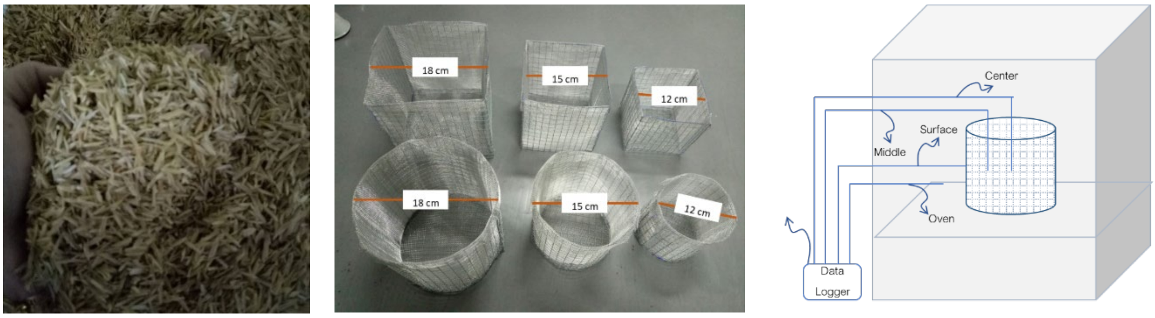
Figure 1 Storage size

เมื่อ r_0 คือ รัศมี และ l_0 คือ ครึ่งหนึ่งของความสูง

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองหาอุณหภูมิการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของแกลบ ดำเนินการโดยเริ่มจากการสุ่มเก็บตัวอย่างแกลบ จัดเตรียมภาชนะบรรจุตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์มีความยาวด้าน 12, 15, และ 18 เซนติเมตร และภาชนะทรงกระบอกขนาดความสูงเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลาง ขนาด 12, 15, และ 18 เซนติเมตร ติดตั้งพร้อมตั้งค่าอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple K-Type) จำนวน 4 จุด ได้แก่ บริเวณจุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ บริเวณจุดกึ่งกลางระหว่างจุดกึ่งกลางและผิวชิ้นทดสอบ บริเวณผิวชิ้นทดสอบ และภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ดัง Figure 2(c) ทำการอบชิ้นทดสอบภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ปรับตั้งค่าอุณหภูมิโดยการสุ่ม และเพิ่มลดอุณหภูมิครั้งละ

1°C เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการลุดติดไฟแบบสพอนเทเนียส (T_{ig}) หลังจากมีการให้ความร้อน อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบมีค่าน้อยกว่า อุณหภูมิภายในเตาอบในช่วงแรกเนื่องจากความชื้นภายในวัสดุทดสอบ เมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งอุณหภูมิที่กึ่งกลางชิ้นงานมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงถึงความสามารถในการจุดติดไฟแบบสพอนเทเนียสของชิ้นทดสอบ



(a) Husk sample (b) Cubic and cylinder basket (c) Thermocouple set up

Figure 2 Spontaneous ignition of husk experiment equipment and set up.

ผลและวิจารณ์

ชิ้นทดสอบที่เกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส จะพบว่าเนื้อแกลบบริเวณช่วงกลางของชิ้นทดสอบเปลี่ยนเป็นสีดำ ดังแสดงใน Figure 3 เนื่องจากการเกิดกระบวนการไพโรไลซิสภายในก้อนทดสอบ ลักษณะขยายเป็นวงกว้างรอบจุดกึ่งกลางสู่ผิวชิ้นงาน ส่วนเนื้อแกลบที่ยังไม่เปลี่ยนเป็นสีดำจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับสีแกลบก่อนนำเข้าตู้ทดสอบ

Figure 3 Spontaneous ignition of husk in the basket.

1. อุณหภูมิลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส (T_{ig})

จากการทดลองของชิ้นทดสอบทรงลูกบากศ์ และทรงกระบอกขนาด 12, 15 และ 18 เซนติเมตร พบว่าชิ้นงานทดสอบขนาดเล็กกว่า ใช้อุณหภูมิตู้อบที่ทำให้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางมีค่ามากกว่าอุณหภูมิตู้อบและเกิดการลุกแบบสพอนเทเนียส (T_{ig}) มากกว่าชิ้นงานทดสอบขนาดใหญ่กว่า ในทางตรงกันข้ามกลับใช้เวลาน้อยกว่า ดังแสดงใน Figure 4 ค่า T_{ig} ของชิ้นทดสอบทรงลูกบากศ์ ขนาด 12, 15 และ 18 เซนติเมตร เท่ากับ 182°C, 175°C และ 170°C ตามลำดับ และ ชิ้นทดสอบทรงกระบอก ขนาด 12, 15 และ 18 เซนติเมตร เท่ากับ 183°C, 175°C และ170°C ตามลำดับ จากค่า T_{ig} ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อภาชนะทดสอบมีขนาดใหญ่ขึ้นจะใช้อุณหภูมิแวดล้อมที่ทำให้เกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสน้อยลง เนื่องจากภาชนะทดสอบที่ใหญ่กว่ามีความสามารถในการระบายความร้อนจากจุดกึ่งกลางที่ด้อยกว่าภาชนะทดสอบที่เล็กกว่า เกิดเป็นความร้อน

สะสมภายในกระทั่งเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสดังกล่าว อีกทั้งเห็นได้ว่าชิ้นทดสอบทั้งสองรูปทรงขนาด 15 เซนติเมตร และ ขนาด 18 เซนติเมตร มีค่า T_{ig} เท่ากัน คือ 175°C และ 170°C อาจสรุปได้ว่าเมื่อชิ้นงานทดสอบมีขนาดใหญ่ขึ้น รูปทรงไม่มีผลต่ออุณหภูมิในการเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของวัตถุ

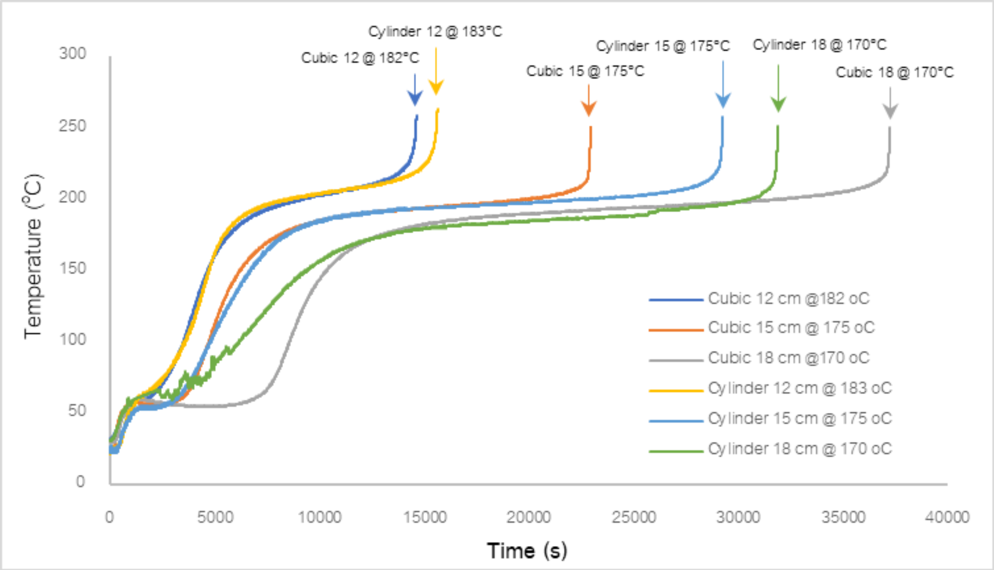


Figure 4 Center temperature of husk sampling.

2. หาค่า $E/\bar{R}$ และ $A\Delta h_c/k$

คำนวณเพื่อหาค่า $E/\bar{R}$ และ $A\Delta h_c/k$ จากค่า T_{ig} ที่ได้จากการทดลอง ตาม Table 1 สำหรับ ชิ้นงานทดสอบทรงลูกบากศ์ และ Table 2 สำหรับชิ้นงานทดสอบทรงกระบอก ได้กราฟและสมการเส้นตรง

Table 1 Spontaneous ignition result of husk in cubic basket size 12, 15 and 18 cm.

Cube $2r_0$ (mm)	r_0 (m)	T_{ig} (°C)	T_{ig} (K)	δ_C	$y = \ln\left[\delta_c\left(\frac{T_{ig}^2}{r_0^2}\right)\right]$	$x = \frac{1}{T_{ig}}$
120	0.060	182	455	2.52	18.79	0.00220
150	0.075	175	448	2.52	18.31	0.00223
180	0.090	170	443	2.52	17.93	0.00226

Table 2 Spontaneous ignition result of husk in cylinder basket size 12, 15 and 18 cm.

Cylinder $2r_0$, $2l_0$ (mm)	l_0 (mm)	r_0 (m)	T_{ig} (°C)	T_{ig} (K)	δ_C	$y = \ln\left[\delta_c\left(\frac{T_{ig}^2}{r_0^2}\right)\right]$	$x = \frac{1}{T_{ig}}$
20	0.060	0.060	183	456	2.84	18.92	0.00219
150	0.075	0.075	175	448	2.84	18.43	0.00223
180	0.090	0.090	170	443	2.84	18.05	0.00226

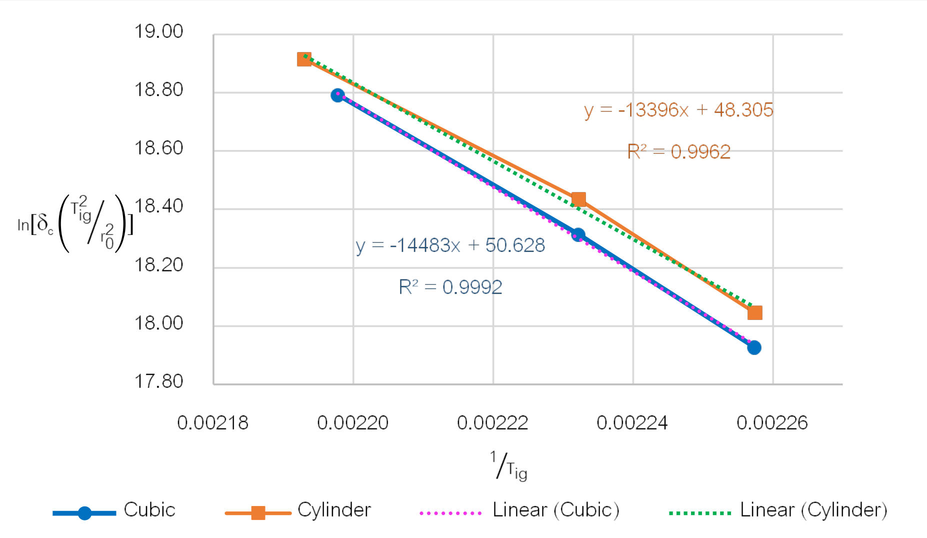


Figure 5 Linear equation of spontaneous ignition result.

จาก Figure 5 ความชันของกราฟ คือ E/ $\bar{R}$ มีค่าเท่ากับ 14483 K สำหรับทรงลูกบากศ์ และ 13396 K สำหรับทรงกระบอก และคำนวณหาค่า $A\Delta h_c/k$ ได้เท่ากับ 6.71×10^{17} K/m^2 และ 7.11×10^{16} K/m^2 สามารถเขียนสมการหาค่า Damkohler ตามสมการที่ (5 (และ สมการที่ (6(

ลูกบาศก์ ด้านยาว $2r_0$;

$$\delta_c = \left(9.72 \times 10^{21}\right)\left(\frac{r_0^2}{T_\infty^{\ 2}}\right) e^{-\frac{14483}{T_\infty}} \tag{5}$$

ทรงกระบอกรัศมี r_0 ยาว $2l_0$;

$$\delta_c = \left(9.52 \times 10^{20}\right)\left(\frac{r_0^2}{T_\infty^{\ 2}}\right) e^{-\frac{13396}{T_\infty}} \tag{6}$$

3. **เปรียบเทียบค่าพลังงานกระตุ้น** (Activation Energy: E) **ของแกลบ**

เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานกระตุ้น (E) ที่ได้จากการทดลองของทั้งสองรูปทรง รวมถึงเทียบกับการทดลองอื่นได้ดังแสดงใน Table 3 พบว่าค่า E ของแกลบทรงลูกบาศก์ และทรงกระบอก มีความใกล้เคียงกัน ต่างกันน้อยกว่า 8% เป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า E เป็นคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ไม่ขึ้นกับรูปทรง แต่เมื่อเทียบกับการทดลองอื่นพบความแตกต่าง คาดว่าเป็นผลมาจากการใช้แกลบที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน เช่น พันธุ์ข้าว ลักษณะความพรุน ความหนาแน่น วิธีการจัดเก็บ อีกทั้งการปนเปื้อนของแกลบ

Table 3 Husk activation energy values.

Material (Shape)	Activation Energy: E (kJ/mole(	References
Husk (Cubic)	73.58	Pen-apa, (2016)
Husk (Cubic)	120.41	Present experiment
Husk (Cylinder)	111.37	Present experiment

4. การประเมินลักษณะการกองเก็บที่ปลอดภัยจากการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส

จากข้อมูลข้างต้นที่ว่า หาก δ มากกว่า δ_C เป็นเงื่อนไขในการเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส ดังนั้น สามารถประเมินการกองเก็บที่ปลอดภัยได้จากการออกแบบการกองเก็บในลักษณะที่มี δ น้อยกว่า δ_C โดยสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (7) จะได้สมการที่ (8)

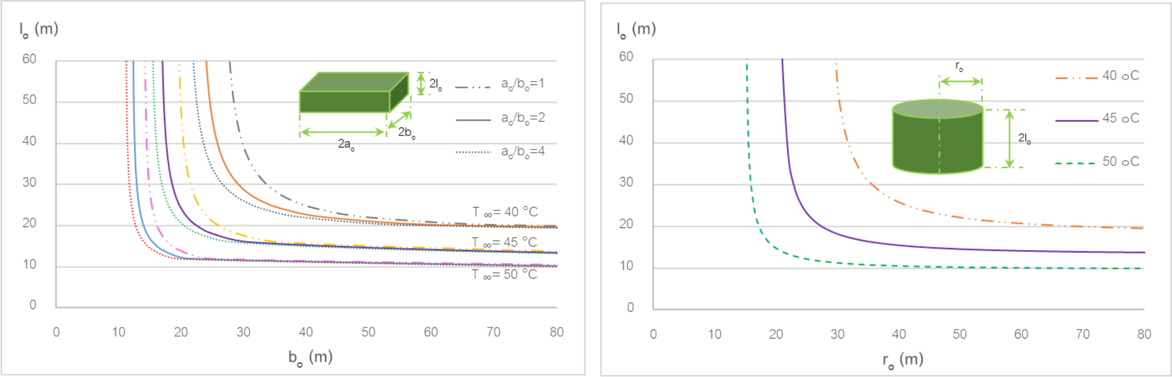
ทรงสี่เหลี่ยมขนาด $2r_0 \times 2l_0 \times 2S_0$ โดย $r_0 < l_0, S_0$;

$$0.873\left[1+\left(\frac{r_0}{l_0}\right)^2+\left(\frac{r_0}{S_0}\right)^2\right] = \left(9.52 \times 10^{20}\right)\left(\frac{r_0^2}{T_\infty^2}\right)e^{-\frac{13396}{T_\infty}} \quad (7)$$

ทรงกระบอกรัศมี r_0 ยาว $2l_0$;

$$2.0+0.841\left(\frac{r_0}{l_0}\right)^2 = \left(9.52 \times 10^{20}\right)\left(\frac{r_0^2}{T_\infty^2}\right)e^{-\frac{13396}{T_\infty}} \quad (8)$$

Figure 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสกับขนาดการกองเก็บแกลบ โดยแสดงอุณหภูมิ 40°C – 50 °C ซึ่งเป็นสิ่งแวดล้อมทั่วไปในประเทศไทย จะเห็นได้ว่าทั้งรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก กราฟแสดงขนาดกองเก็บลู่เข้าสู่อนันต์ ที่ T_∞ เดียวกัน จึงสามารถกล่าวได้ว่า เมื่อการกองเก็บมีขนาดใหญ่ขึ้นมากๆ รูปทรงไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากในการเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส การประเมินการกองเก็บนั้นสามารถประเมินได้จากกราฟ การกองเก็บใดๆที่อยู่ในพื้นที่ใต้กราฟมีความเสี่ยงต่ำที่จะเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส เพื่อความปลอดภัยแนะนำให้กองเก็บแกลบที่ความสูงไม่เกิน 29 เมตร, 20 เมตร และ 15 เมตร ในอุณหภูมิแวดล้อมที่ 40°C, 45°C และ 50 °C ตามลำดับ



(a) Cubic (b) Cylinder

Figure 6 Spontaneous ignition temperature and storage size relation.

สรุป

การใช้ทฤษฎีของ Frank – Kamenetskii เพื่อศึกษาคุณสมบัติการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของแกลบ พบ อุณหภูมิแวดล้อมที่ทำให้เกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียสของชิ้นทดสอบทรงลูกบาศก์ ขนาด 12, 15 และ 18 เซนติเมตร เท่ากับ 182°C, 175°C และ170°C ตามลำดับ และ ชิ้นทดสอบทรงกระบอก ขนาด 12, 15 และ 18 เซนติเมตร เท่ากับ 183°C, 175 C และ170°C ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ไม่มี

การเปลี่ยนแปลงตามขนาด รูปทรง และอุณหภูมิ จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง ได้ค่า $E/\overline{R}$ เท่ากับ 14483 K สำหรับทรงลูกบาศก์และ13396 K สำหรับทรงกระบอก และค่า $A\Delta h_c/k$ เท่ากับ 6.71×10^{17} K/m^2 สำหรับทรงลูกบาศก์และ 7.11×10^{16} K/m^2 สำหรับทรงกระบอก

การประเมินการกองเก็บที่ปลอดภัยจากการเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส สามารถประมาณได้จากกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่กับขนาดการกองเก็บแกลบ การกองเก็บใดๆ ที่อยู่ในพื้นที่ใต้กราฟมีความเสี่ยงต่ำที่จะเกิดการลุกติดไฟแบบสพอนเทเนียส

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการปริญญาโท สาขาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย(ภาคพิเศษ) และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการทดสอบและเครื่องมืออุปกรณ์ประกอบการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

ข่าวสด. 2559. **ไหม้ระทึกโรงงานปุ๋ยโคราช ระดมฉีดน้ำ 3 ชั่วโมง ยังคุมเพลิงไม่ได้** (Online). https://www.khaosod.co.th/breaking-news/news_36322, 6 ตุลาคม 2559.

ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2560. **พลศาสตร์อัคคีภัย**. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เดลินิวส์. 2558. **ไฟไหม้โรงผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวล** (Online). http://www.dailynews.co.th/Content/regional/304029, 27กุมภาพันธ์ 2558.

ไทยรัฐออนไลน์. 2559. **ร้อนไฟลุก! อีสานทะลุ 43 องศาฯ ไหม้สายพานโรงไฟฟ้า ดับกันวุ่น**. (Online). https://www.thairath.co.th/content/606597, 16 เมษายน 2559.

เบญจมาศ ทองศรี. 2558. **การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของขี้เลื่อย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พงษ์ศักดิ์ พงษ์สัมณะ. 2558. **การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของกากอ้อย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เพ็ญอาภา บุญมาดี. 2559. **การศึกษาเชิงทดลองการลุกไหม้ได้เองของแกลบข้าว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2561. **ผลผลิตข้าว** (Online). http://www.thairiceexporters.or.th/production.htm, ธันวาคม 2561.

Quintiere, J.G. 2006. Fundamentals of Fire Phenomena. John Wiley & Sons Ltd, England.

Zalosh, R.G. 2002. Industrial Fire Protection Engineering. John Wiley & Sons Ltd, England.

Moqbel, S. 2010. Factors Influencing Spontaneous Combustion of Solid Waste. Master Thesis, University of Central Florida.

Tamburello, S.M. 2011. On Determining Spontaneous Ignition in Porous Materials. Master Thesis, University of Maryland.

แบบจำลอง CFD-DEM ของเมล็ดข้าวโพดในฟลูอิไดซ์เบด

CFD-DEM Simulation of Corn Particles in a Fluidized Bed

จักรกฤษณ์ วรรณผ่องใส[1*] ศุภกร เกตุเปลี่ยน[1] และ ปรีดา ปรากฏมาก[1]

Jakkrit Wannaphongsai[1*], Supakorn Ketpien[1] and Preeda Prakotmak[1]

บทคัดย่อ

การคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ร่วมกับวิธีวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DEM) แบบสามมิติ ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการไหลของอนุภาครูปทรงข้าวโพดในฟลูอิไดซ์เบดชนิดท่อทรงกระบอก เฟสก๊าซถูกสร้างด้วยแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$ และการเคลื่อนที่ของอนุภาคจำลองด้วย DEM โดยคำนวณด้วยวิธีปริมาตรเฉลี่ยแบบคาบเกี่ยวกันของสมการอนุรักษ์พลังงาน มวล และโมเมนตัมบนโดเมนที่ถูกแบ่งเป็นช่วงระยะสั้นๆ อนุภาครูปทรงข้าวโพดถูกสร้างขึ้นโดยทรงกลมหลายอัน (ได้แก่ 4, 6 และ 8 ทรงกลม) ส่วนอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาค และอนุภาคกับผนังถูกจำลองโดยประยุกต์การสัมผัสกันของ Hertz-Mindlin งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิไดเซชัน (U_{mf}) และความดันตกคร่อม (ΔP) ด้วยอนุภาคข้าวโพดที่แตกต่างกัน 3 รูปทรง ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วของของไหลและรูปร่างอนุภาคที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน ผลการจำลองพบว่า U_{mf} เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มจำนวนและการจัดเรียงขององค์ประกอบทรงกลม เมื่อจำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้น U_{mf} และ ΔP_{max} จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ABSTRACT

Three dimensionally coupled computational fluid dynamics (CFD) and discrete element method (DEM) were used to investigate the flow of corn-shaped particles in a cylindrical fluidized bed. The gas phase was modeled with $k-\varepsilon$ turbulent model and the particle motion was modeled with DEM. The particle motion is coupled with the volume averaged conservation of mass, momentum and energy equations over discretized domain. The corn-shaped particles were constructed by a multi-sphere (i.e. 4, 6 and 8-spherical element). The particle-particle and particle-wall interaction is modeled using Hertz-Mindlin no-slip contact. The minimum fluidization velocity (U_{mf}) and pressure drops (ΔP) were studied with 3 different corn particles. The influence of fluid velocity and particle shaped on heat transfer were discussed. The simulation results showed that the U_{mf} increased with increasing the number and the arrangement of the spherical elements. As the number of particles increased, the U_{mf} and ΔP_{max} increased.

Key words: CFD, corn, DEM, fluidized bed, multi-phase flow

* Corresponding author; e-mail address: fengpdpr@ku.ac.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Khamphengsean Campus, Nakhon Pathom 73140

คำนำ

การไหลแบบหลายสถานะ (Multi-phase flow) โดยมีอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ไปพร้อมของไหล พบเห็นได้หลายรูปแบบ เช่น กระบวนการฟลูอิไดซ์เบด (Tsuji et al., 1998; Ma and Zhao, 2017) สปาเต็ดเบด (Takeuchi et al., 2005) การขนถ่ายวัสดุ (Owen and Cleary, 2009) และระบบดักฝุ่น (Yu et al., 2017) สำหรับกระบวนการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันถือว่าเป็นระบบการไหลแบบหลายสถานะ โดยเมล็ดข้าวโพดจะถูกอากาศร้อนจากด้านล่างของห้องอบแห้งผลักดันให้เมล็ดข้าวโพดลอยตัวและตกลงสลับกันตลอดเวลา ซึ่งส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างอากาศร้อนกับเมล็ดข้าวโพดเป็นไปอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ในปัจจุบันการศึกษาพลศาสตร์ของการไหลแบบหลายสถานะเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการเคลื่อนที่ด้วยการทดลองนั้นต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้การวัดค่าต่างๆ ในระหว่างการทดลองเป็นการรบกวนระบบทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องน้อยลง วิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete element modeling, DEM) โดยคำนวณร่วม (Coupling) กับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) ได้รับการยอมรับและเป็นที่สนใจอย่างยิ่งในการศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบหลายสถานะโดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการฟลูอิไดเซชันที่มีทั้งอากาศและอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถเก็บรายละเอียดข้อมูลของการเคลื่อนที่ของอนุภาคและการไหลที่ซับซ้อนได้โดยไม่รบกวนลักษณะทางกายภาพของระบบ เช่น ตรวจสอบเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Trajectory) และแรงที่กระทำในแต่ละอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient force)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่ได้นำแบบจำลอง CFD-DEM มาทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบฟลูอิไดซ์เบดและสปาเต็ดเบดโดยที่รูปร่างอนุภาคเป็นแบบทรงกลมเท่านั้น (Ren *et al.,* 2011; Rong and Zhan, 2010; Takeuchi *et al*., 2008) ซึ่งแตกต่างจากรูปร่างของอนุภาคจริง ที่มีรูปร่างทรงรี ทรงกระบอก และแคปซูล เป็นต้น และมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่จำลองเมล็ดข้าวโพดให้ใกล้เคียงรูปร่างจริง โดย Ren et al. (2012) ได้จำลองรูปร่างเมล็ดข้าวโพดด้วยวิธี Multi-sphere ในสปาเต็ดเบดที่ความเร็วลมต่างกันพบว่า ข้าวโพดที่สร้างจากจำนวน 4ทรงกลมมาต่อกันเป็นหนึ่งเมล็ดสามารถทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า 7 ทรงกลม นอกจากนี้ Hilton *et al.* (2010) และ Zhou *et al.* (2011) ได้ศึกษาพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของอนุภาครูปทรงรี (Ellipsoidal particles) ที่มีต่อความดันภายในเบด และพบว่ารูปร่างของอนุภาคมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างข้าวโพดในระบบฟลูอิไดซ์เบดยังมีไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของอนุภาครูปทรงเมล็ดข้าวโพดในห้องอบแห้งฟลูอิไดซ์เบดด้วยแบบจำลอง CFD-DEM และคำนวณหาความเร็วลมต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชันเพื่อเป็นข้อมูลในการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเทคนิคนี้

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องทราบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุ การทดลองทำได้โดยนำเมล็ดข้าวโพดไฮบริกซ์3 มีความชื้นประมาณ 22 w.b. มาวัดขนาด ความยาว(L) กว้าง(W) และหนา(T) ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์จำนวน 50 ซ้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย และนำขนาดของข้าวโพดที่วัดได้ไปสร้างแบบจำลองเมล็ดข้าวโพดแบบ Multi-sphere ด้วยการนำทรงกลมมาเชื่อมต่อกันเป็นรูปร่างที่ใกล้เคียงกับขนาดของเมล็ดข้าวโพดจริง โดยจำลองเป็น 3 แบบ ได้แก่ 4, 6 และ 8-spherical ดังแสดงใน Figure 1 ทรงกลมจะต่อแบบ

ซ้อนทับกันบางส่วน โดยทั่วไปการเพิ่มจำนวนทรงกลมหลายอันจะได้รูปทรงที่ใกล้เคียงกับเมล็ดข้าวโพดแต่ต้องใช้เวลาในการจำลองปัญหาเพิ่มขึ้นอีกหลายเท่า พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแสดงใน Table1 และ 2 สามารถสืบค้นที่มาของค่าเหล่านี้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Ren *et al.*, 2012; Wei *et al.*, 2017)

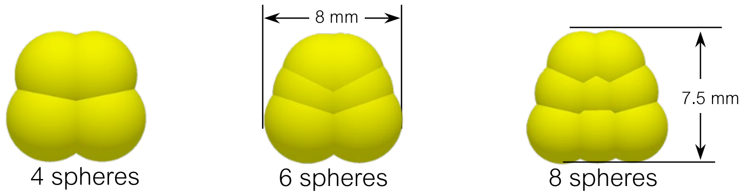


Figure 1 Representation of corn grains using multi-sphere method.

Table 1 Physical and numerical parameters for CFD-DEM simulations.

Type	Parameters	Value
Corn	Density (kg/m^3)	1385
	Poisson ratio	0.25
	Shear modulus, G_p(Pa)	1.6 x 10^9
	Effective diameter, D_e (mm)	6.6.7-4
Acrylic (Drying column)	Density (kg/m^3)	1180
	Poisson ratio	0.33
	Shear modulus, G_p(Pa)	1.6 x 10^9
Corn vs. Corn	Restitution coefficient, e	0.59
	Coefficient of static friction, μ_s	0.28
	Coefficient of rolling friction, μ_r	0.3
Corn vs. Drying column	Restitution coefficient, e	0.59
	Coefficient of static friction, μ_s	0.34
	Coefficient of rolling friction, μ_r	0.4
Simulation	Grid type	Hexahedron
	Grid number (CFD)	1736
	CFD time step (s)	30. x 10^{-4}
	DEM time step (s)	3.0 x 10^{-6}
	Simulation duration (s)	8

Table 2 Values of parameters for case studies.

Parameters	4spheres	6 spheres	8 spheres
Number of simulated particles	5750	6120	7200
Total solid mass (g)	1013.76	1077.12	1267.2
Surface area of a corn (mm^2)	171.70	163.42	154.14
Volume of a corn (m^3)	1.839e-07	1.775e-07	1.481e-07
Air inlet velocity (m/s)		1-3Umf	
Air temperature (^{o}C)		60	
Initial particle temperature (^{o}C)		29	
Initial bed height (mm)		100	

แบบจำลอง CFD-DEM

แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ภายในฟลูอิไดซ์เบดมีอนุภาคของแข็งและของไหลซึ่งมีอันตรกิริยาระหว่างกัน โดยอนุภาคของแข็งจะมีพฤติกรรมการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองการไหลของอากาศ (CFD) ด้วยวิธี Eulerian-Lagrangian ร่วมกับการวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DEM) การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค (index i) มวล m_i และปริมาตร V_i ในระบบจะคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ดังนี้

$$\boldsymbol{m\frac{dv_i}{dt} = m_i\frac{d^2r_i}{dt^2} = -V_i\nabla p + \frac{V_i\beta}{1-\varepsilon}\left(\mathbf{u}_g - v_i\right) + m_i g + F_{c,i} + F_{A,i}} \qquad (1)$$

เมื่อ v_i คือความเร็ว และ r_i คือเวกเตอร์แสดงตำแหน่งของอนุภาค i ส่วนแรงที่แสดงด้านขวาของสมการที่ (1) คือ ความแตกต่างของความดัน (Pressure gradient) แรงต้านอากาศ (Drag) แรงโน้มถ่วง (Gravity) แรงสัมผัส (Contact force) และแรงดึงดูดระหว่างมวล (Van der Waals) ซึ่งแรงนี้จะไม่คิดในแบบจำลอง ในระหว่างการเคลื่อนที่อนุภาคจะเกิดการหมุนไปด้วยอธิบายจากสมการโมเมนตัมเชิงมุมดังนี้

$$\boldsymbol{I_i\frac{d\omega_i}{dt} = T_i} \qquad (2)$$

เมื่อ T_i คือทอร์ก I_i คือโมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาค i ส่วนค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม รายละเอียดการคำนวณค่า β โดยพิจารณาจากความพรุน ε ของอนุภาคสืบค้นจาก ปรีดา และคณะ (2562) สำหรับของไหลจะพิจารณาให้อยู่ในรูปการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuum) ห้องอบแห้งจะถูกแบ่งในรูปแบบตารางโครงข่าย (mesh) การเคลื่อนที่ของของไหลจะถูกคำนวณโดยการเฉลี่ยปริมาตร (Volume-averaged) จากสมการ Navier-Stokes และสมการ Continuity ดังนี้

$$\boldsymbol{\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho_g) + \nabla\cdot(\rho_g\varepsilon\mathbf{u}_g) = 0} \qquad (3)$$

สมการความปั่นป่วนของของไหล (Turbulence) เป็นแบบ $k-\varepsilon$ และการถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยนี้พิจารณาจากสมการที่ (4) โดยมีสมมติฐานที่ว่าอัตราการเพิ่มของพลังงานในอนุภาคแต่ละตัว(เทอมซ้ายมือ) จะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนรวมกับการนำความร้อนระหว่างอนุภาค (เทอมขวามือ)

$$m_pC_p\frac{dT}{dt} = h_{PF}A_p\Delta T_{PF} + h_c\Delta T_{P_1P_2} \qquad (4)$$

เมื่อ m_p, C_p, T คือมวล ความร้อนจำเพาะ และอุณหภูมิของอนุภาคตามลำดับ h_{PF} คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน A_p คือพื้นที่ผิวของอนุภาค ΔT_{PF} คือผลต่างอุณหภูมิระหว่างอนุภาคกับอากาศร้อน h_c คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และ $\Delta T_{P_1P_2}$ คือผลต่างอุณหภูมิระหว่างอนุภาค ที่มาของค่า h_{PF} และ h_c สามารถสืบค้นจากงานวิจัยของ Hobbs (2009) สำหรับแบบจำลอง CFD-DEM มีสมมติฐานดังนี้ 1) อุณหภูมิ ความหนาแน่น และความหนืดของอากาศมีค่าคงที่ 2) ไม่คิดการถ่ายเทมวลระหว่างเมล็ดข้าวโพดและอากาศ 3) การชนกันระหว่างเมล็ดข้าวโพดกับข้าวโพดและระหว่างเมล็ดข้าวโพดกับผนังห้องอบใช้สมการของ Hertz-Mindlin (Mindlin and Deresiewicz, 1953) และเป็นแบบ Soft sphere model 4) เมล็ดข้าวโพดเป็นแบบ Homogeneous

หลักการคำนวณของวิธี CFD-DEM ซึ่งแสดงรายละเอียดของสมการที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจากงานวิจัยของ ปรีดา และคณะ (2562) งานวิจัยนี้ได้ทดลองหาจำนวน Grid ที่เหมาะสม (Grid independent) โดยกำหนดให้ Grid หยาบขึ้นเพื่อให้มีจุดคำนวณน้อยลงแต่ต้องไม่ส่งผลกระทบต่อคำตอบที่ได้ วิธีการจำลอง CFD-DEM ด้วย Ansys Fluent โดยคำนวณแลกเปลี่ยนข้อมูล (Coupling) กับ EDEM สำหรับ Model validation สืบค้นจากงานวิจัยของ ปรีดา (2562ก)

Figure 2a แสดงขนาดโดเมนที่พิจารณาในกระบวนการฟลูอิไดซ์เบดภายในเบดบรรจุเมล็ดข้าวโพดให้มีความสูงเบดเริ่มต้น 100 mm อากาศร้อนจะเข้าสู่เบดทางด้านล่างโดยมีความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด อากาศร้อนจะไหลออกทางด้านบนของห้องอบแห้งโดยโดเมนที่พิจารณาสร้างจากอะคริลิคใสเพื่อให้เห็นโปรไฟล์การกระจายตัวของข้าวโพด ภาพรวมของระบบฟลูอิไดซ์เบดสำหรับการทดลองอบแห้งข้าวโพดเป็นดัง Figure 2b

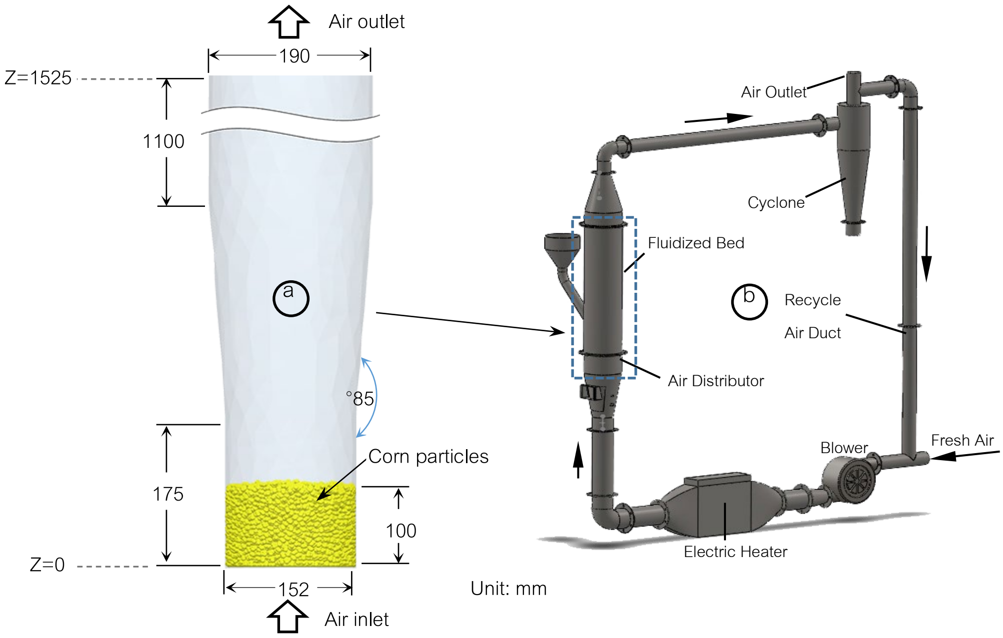


Figure 2 a) CFD-DEM simulation domain of fluidized bed b) fluidized bed experimental setup.

ผลการทดลองและวิจารณ์

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ เนื่องจากความเร็วของอากาศเข้าเบดต่ำจะทำให้วัสดุภายในเบดมีสภาวะเบดนิ่ง ถ้าความเร็วอากาศสูงเกินไปวัสดุจะหลุดลอยออกไปจากเบด ในงานวิจัยนี้จำลองการเกิดฟลูอิไดเซชันของอนุภาครูปทรงข้าวโพด 3 แบบ ได้แก่ 4, 6และ 8 spheres เมื่อปล่อยเมล็ดข้าวโพดให้ตกอย่างอิสระจนความสูงเบดเท่ากับ 100 mm เท่ากันทั้ง 3 กรณี ข้าวโพดแบบ 4, 6และ 8 spheres มีจำนวนเท่ากับ5750 , 6120และ 7200 ตามลำดับ เนื่องจากรูปทรงแบบ 8 spheres มีลักษณะทางกายภาพที่มีผิวโค้งสั้นกว่า เมื่อเรียงตัวในเบดสามารถอยู่ชิดกันได้มากขึ้นทำให้เกิดช่องว่างในอากาศน้อยจึงมีจำนวนเมล็ดข้าวโพดในเบดมากกว่ากรณีอื่น ดังแสดงใน Table 2 การจำลองเริ่มจากปล่อยอากาศให้ไหลเข้าทางด้านล่างของเบด โดยเพิ่มความเร็วอากาศจาก 0- 3m/s ภายในระยะเวลา 1.5s ด้วยคำสั่ง User defined function (UDF) หลังจากข้าวโพดลอยตัวจะทำให้ความดันคร่อมเบดลดลง จากนั้นคำนวณค่าความดันตกคร่อมที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วอากาศดังแสดงใน Figure 3 ผลการจำลองพบว่าขณะที่อากาศยังมีความเร็วต่ำ

อนุภาคจะไม่ขยับตัว ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่าเบดนิ่ง (Fixed bed) ถ้าเพิ่มความเร็วของอากาศถึงระดับหนึ่ง วัสดุจะเริ่มขยับตัวและจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่าฟลูอิไดเซชันต่ำสุด (Minimum fluidizing velocity, U_{mf}) ที่จุดนี้ความดันจะมีค่าสูงสุด เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศต่อไปจนมีค่าสูงกว่า U_{mf} ความดันคร่อมเบดจะลดลง น้ำหนักของข้าวโพดถูกรองรับโดยกระแสของไหล

ในการจำลองจะกำหนดให้เมล็ดข้าวโพดทั้ง 3 แบบ มีน้ำหนักต่อหนึ่งเมล็ดเท่ากันคือ 0.1763g เพื่อสังเกตอิทธิพลของรูปร่างที่มีต่อการลอยตัวและความดันในเบด Figure 3 พบว่าข้าวโพดทีมีรูปร่าง 8 spheres ค่าความดันตกคร่อมเบดสูงสุด (ΔP_{max}) เนื่องจากมีจำนวนเมล็ดที่ความสูงเบดเริ่มต้นเท่ากันมากกว่ากรณีอื่น การจัดเรียงตัวของข้าวโพด 8 spheres มีช่องว่างในเบดน้อยกว่าการเรียงตัวของข้าวโพด 4 และ 6 spheres อากาศไหลจึงผ่านได้ยากกว่าความดันจึงมีค่าสูง นอกจากนี้พบว่าค่า U_{mf} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เมล็ดข้าวโพดที่มีจำนวน Spheres มากขึ้น ค่าเฉลี่ยของ U_{mf} มีค่าประมาณ 1.1 m/s ในการจำลองพลศาสตร์ของข้าวโพดจะใช้ความเร็วนี้เป็นค่าอ้างอิงความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชันในทุกกรณีการจำลอง

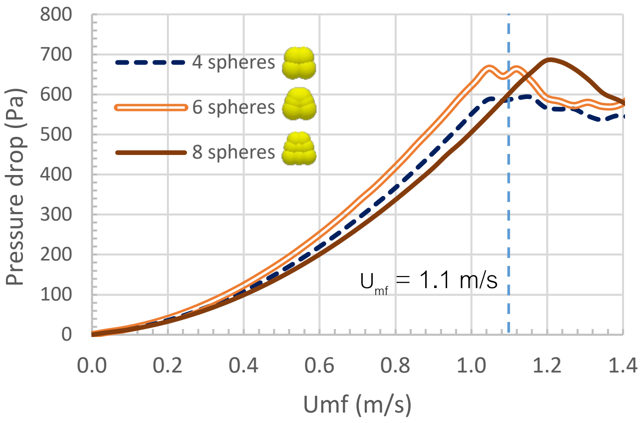


Figure 3 Simulated minimum fluidization velocity (U_{mf}) at different corn-shaped particles.

Figure 4 เปรียบเทียบโปรไฟล์การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวโพด พบว่าการเกิดฟองอากาศในเบดระหว่างการทดลองและผลการจำลองแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากในการทดลองเมล็ดข้าวโพดอาจมีขนาดที่ไม่เท่ากันทุกเมล็ดซึ่งควบคุมได้ยาก แต่การจำลองกำหนดให้มีขนาดเมล็ดเท่ากันได้ อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความพรุนของเบดแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามโปรไฟล์การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวโพดที่เวลาต่างๆ มีความคล้ายคลึงกัน

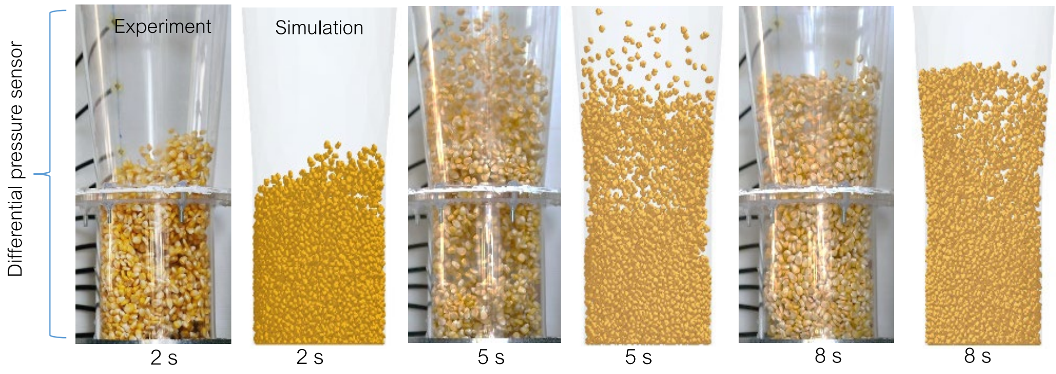


Figure 4 Instantaneous snapshot of flow pattern in the fluidized bed at $3U_{mf}$ for different time steps of 6-spherical element.

Figure 5 แสดงการลักษณะการกระจายตัวและความเร็วของเมล็ดข้าวโพดแบบ 6spheres ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ U_{mf}, $2U_{mf}$ และ $3U_{mf}$ ณ เวลา 4s ของการจำลอง โดยเลือกแสดงรูปเป็นระนาบตัดขวางหนา 2 cm ในบริเวณกึ่งกลางเบด พบว่าเมล็ดข้าวโพดมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น การใช้ความเร็วของอากาศเท่ากับ U_{mf} เมล็ดข้าวโพดจะลอยตัวขึ้นเล็กน้อยและเรียงชิดกันอย่างหนาแน่น โดยมีความเร็วเพียง 0.3 m/s ที่บริเวณด้านบนสุดของเบด แตกต่างจากความเร็วอากาศ $3U_{mf}$ เมล็ดข้าวโพดกลุ่มที่อยู่ด้านบนสุดของเบดถูกยกให้ลอยด้วยกระแสอากาศและเกิดการแยกตัว โดยมีความเร็วอยู่ในช่วง 1.1-1. 2m/s (สเกลสีแดง (ภายในเบดเกิดโพรงอากาศหลายจุด การใช้ความเร็วอากาศ $2U_{mf}$ เพียงพอที่จะทำให้เมล็ดข้าวโพดที่อยู่ด้านล่างหมุนเวียนไปทั่วเบด (ปรีดา และสถาพร, 2562) ช่วยทำให้อนุภาคผสมกันได้ดีมากขึ้นลดปัญหาการเกิดความเค้นเนื่องจากการรับความร้อนมากเกินไป

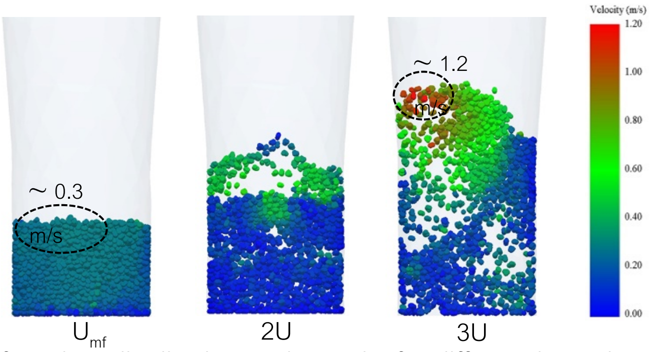


Figure 5 Slice view of particle distribution and velocity for different inlet air velocities of 6-spherical element at 4 s of simulation.

Figure 6 แสดงจำนวนการสัมผัสกันระหว่างเมล็ดข้าวโพดในเบดที่ความเร็วอากาศ $3U_{mf}$ พบว่าช่วง 0- 1 s จะเกิดการสัมผัสกันมากที่สุด เนื่องจากเป็นช่วงที่เมล็ดข้าวโพดลอยตัวจากเบดนิ่งและโดนกระแสอากาศที่มีความเร็วและความดันสูงสุดจึงเกิดการชนกันมาก จำนวนการชนกันของเมล็ดข้าวโพดจะแปรผันตามจำนวนเมล็ดในเบดโดยแบบ 8 spheres ซึ่งมีจำนวนเมล็ดมากที่สุดจึงเกิดจำนวนการชนกันสูงกว่า 4 และ 6 spheres

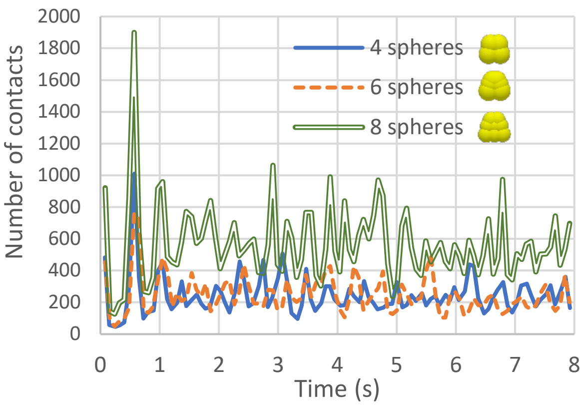


Figure 6 Simulated number of contacts for different corn-shaped particles at $3U_{mf}$.

Figure 7 เปรียบเทียบความดันตกคร่อมเบด (Pressure drop) โดยกำหนดระดับอ้างอิงอยู่ตำแหน่งทางเข้าของเบด Z=0 (ดังแสดงใน Figure 2a) ในการทดลองได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความดันตกคร่อมเบดตามระยะความสูง (ดังแสงใน Figure 4) จาก Figure 7a พบว่าผลการทดลองมีค่าความดันคร่อมเบดที่ $3U_{mf}$.

ใกล้เคียงกับความดันคร่อมเบดจากการจำลองเมล็ดข้าวโพด 4 spheres ที่สุดซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Ren และคณะ (2012) นอกจากนี้ Figure 7a พบว่าผลต่างความดันคร่อมเบดเทียบกับความดันที่ตำแหน่ง Z=0 จะเพิ่มขึ้นตามตามระยะความสูง Z ใดๆ ของเบด เนื่องจากด้านล่างเบดมีเมล็ดข้าวโพดเรียงชิดกันอยู่แน่น หลังจากเมล็ดกลุ่มด้านบนลอยตัว ความพรุนของอนุภาคภายในเบดมากขึ้น อากาศสามารถแทรกตัวและเกิดฟองอากาศไปทั่วทั้งเบด เมล็ดข้าวโพดกลุ่มล่างจึงมีช่องว่างให้สามารถเคลื่อนที่ ความดันจึงมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามระดับความสูงเบด ดังนั้นความดันตกคร่อมเบดจะมีค่าสูงตามจำนวนอนุภาคในเบดดังแสดงใน Figure 7a เนื่องจากเมล็ดข้าวโพด 8spheres มีจำนวนเมล็ดและน้ำหนักในเบดมากกว่าแบบอื่นๆ (ดังแสดงใน Table 2)

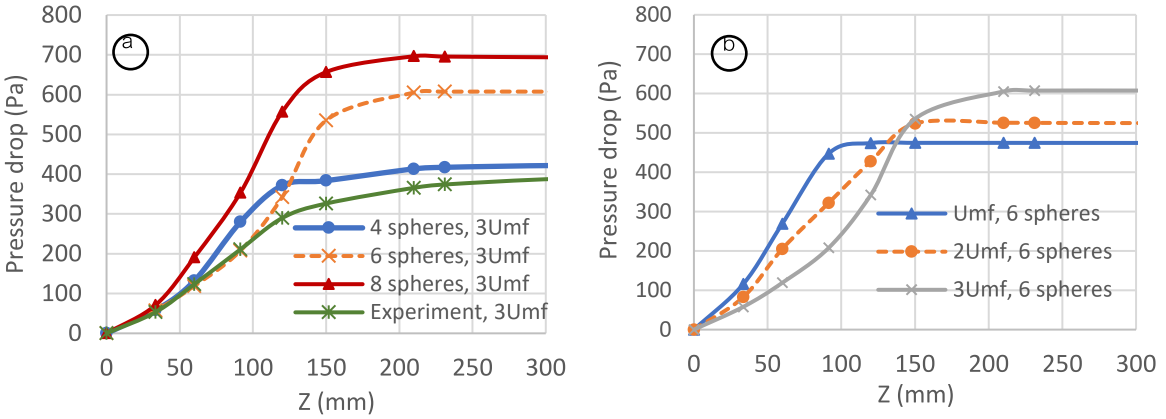


Figure 7 Simulated minimum fluidization velocity (U_{mf}) for a) different corn-shaped particles at $3U_{mf}$ b) different inlet air velocities at 6-spherical element.

Figure 7b แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันตกคร่อมเบดของเมล็ดข้าวโพดแบบ 6 spheres พบว่าในช่วงความสูงเบด Z ตั้งแต่ 0-100 mm ความเร็วอากาศต่ำ (U_{mf}) จะมีค่า Pressure drop สูง เมื่อเกินระยะความสูงของเมล็ดข้าวโพด (Z=100 mm) Pressure drop จะมีค่าคงที่เนื่องจากเมล็ดข้าวโพดจะเริ่มขยับตัวและจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ จาก Figure 7b ที่ระยะ Z มากกว่า 150 mm เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศจะส่งผลให้ Pressure drop จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของข้าวโพดถูกรองรับโดยกระแสของไหลที่มีความเร็วสูง โดยพฤติกรรมนี้เกิดจากสมดุลของแรงจากอากาศที่กระทำต่อวัสดุ

Figure 8 แสดงการลักษณะการกระจายตัวและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดแบบ 8spheres ในช่วงเวลา 0-8 s ของการจำลอง โดยกำหนดความเร็วของอากาศร้อนคงที่เท่ากับ $3U_{mf}$ (60°C) พบว่าในระยะเวลา 8 s เมล็ดข้าวโพดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 29°C เป็น 34°C

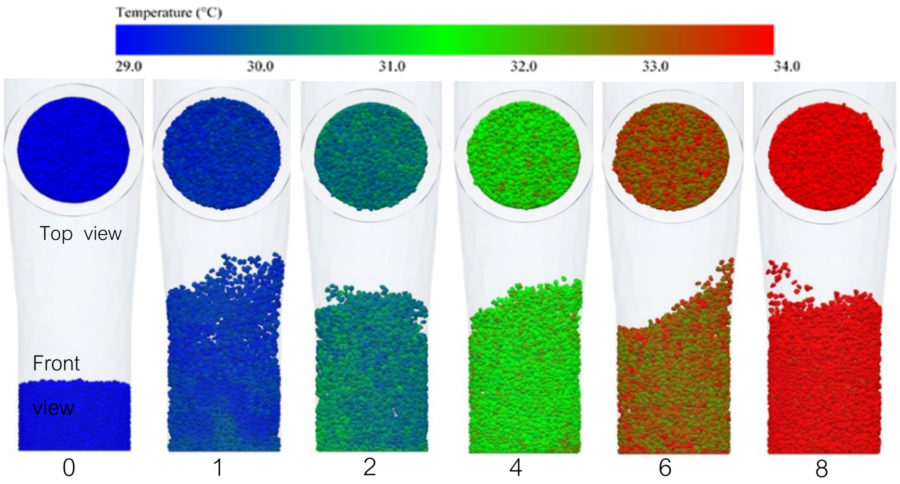


Figure 8 Particle distribution and temperature for different time steps at 3U_{mf} (3.3 m/s) of 8-spherical element.

Figure 9a แสดงอิทธิพลของรูปร่างเมล็ดข้าวโพดที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวโพด พบว่าเมล็ดแบบ 8 spheres มีอุณหภูมิต่ำกว่า 4 และ 6 spheres เล็กน้อย (ประมาณ 0.4°C) เนื่องจากพื้นที่ผิวของเมล็ด 8 spheres มีค่าต่ำกว่าแบบอื่นดังแสดงใน Table 2 ทำให้แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศได้น้อยกว่า สำหรับ Figure 9b แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดแบบ 8 spheres พบว่าความเร็วอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เมล็ดข้าวโพดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากผลการจำลองนี้ยังไม่สามารถระบุได้ว่าอิทธิพลของรูปร่างเมล็ดข้าวโพดจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดข้าวโพดแบบ Multi-sphere อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ เนื่องจากใช้เวลาจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนเพียง 8 s เท่านั้น เป็นข้อจำกัดในด้าน CPU time ซึ่งต้องทำการจำลองเพิ่มเติมต่อไป

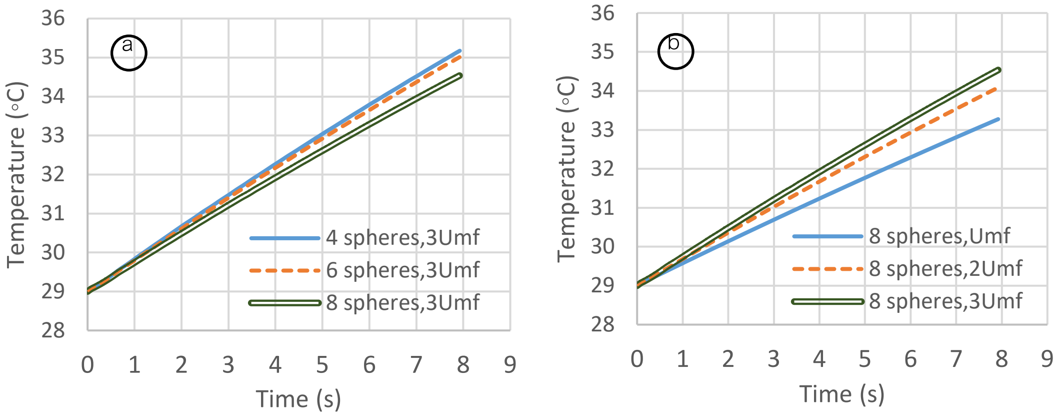


Figure 9 Predicted temperature for a) different corn-shaped particles at inlet air velocity of 3U_{mf}. b) different inlet air velocities at 8-spherical element.

จากการจำลองการเกิดฟลูอิไดเซชันของเมล็ดข้าวโพดแบบ Multi-sphere ทั้ง 3 แบบยังคงต้องอาศัยเทียบกับผลการทดลอง (Validate) ที่วัดค่าได้เช่น ความเร็วอากาศ ความดันตกคร่อมเบด เป็นต้น เพื่อให้ทราบว่ารูปร่างเมล็ดข้าวโพดแบบใดที่สามารถเป็นตัวแทนรูปร่างเมล็ดข้าวโพดจริง

สรุปผลและเสนอแนะ

แบบจำลอง CFD-DEM สามารถทำนายพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวโพดที่สร้างด้วยวิธี Multi-sphere ในระบบฟลูอิไดซ์เบดท่อทรงกลม จากผลการจำลองทำให้ทราบข้อมูลพื้นฐานดังนี้ 1) ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (U_{ml}) มีค่าประมาณ 1.1 m/s (ข้าวโพดมีความชื้น 22 w.b. (2) การเพิ่มความเร็วอากาศจะส่งผลให้ Pressure drop จะมีค่าเพิ่มขึ้นและเกิดโพรงช่องว่างอากาศกระจายทั่วเบด 3) เมื่อเพิ่มจำนวนเมล็ดข้าวโพดในเบด ค่า U_{mf} และ Pressure drop จะมีค่าเพิ่มขึ้น 4) ความเร็วอากาศ $2U_{mf}$ เป็นค่าที่เพียงพอสำหรับการเกิดฟลูอิไดซ์เซชันเพื่อทำให้เมล็ดข้าวโพดเกิดการคลุกเคล้ากันอย่างทั่วถึง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และ ผศ.ดร.สถาพร วังฉาย ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารอ้างอิง

ปรีดา ปรากฏมาก. 2562ก. แบบจำลอง CFD-DEM สำหรับพลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็งในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา** 30(3): 73-89.

ปรีดา ปรากฏมาก, 2562ข. แบบจำลอง CFD-DEM ของความเร็วต่ำสุดในการเกิดระบบฟลูอิไดซ์เซชันสำหรับตัวกลางก๊าซ-ของแข็ง, **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย** 25(1): 19-27.

ปรีดา ปรากฏมาก และสถาพร วังฉาย. 2562ก. การจำลองลักษณะของฟลูอิไดซ์เบดโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่องร่วมกับการคำนวณพลศาสตร์ของไหล. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่** 26(2): 231-242.

Hilton, J.E., L.R Mason. and P.W. Cleary. 2010. Dynamics of gas–solid fluidized beds with non-spherical particle geometry. **Chemical Engineering Science** 65(5): 1584–1596.

Hobbs, A. 2009. Simulation of an aggregate dryer using coupled CFD and DEM methods. **International Journal of Computational Fluid Dynamics** 23(2): 199-207.

Ma, H. Zhao. and Y. 2017. CFD-DEM simulation of fluidization of rod-like particles in a fluidized bed. **Powder Technology** 314: 355-366.

Mindlin R.D. and H, Deresiewicz. .1953 Elastic spheres in contact under varying oblique forces. Transactions of the ASME. Series E Journal of Applied Mechanics 20: .344-327

Owen, P.J. and Cleary, P.W. 2009. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM). **Powder Technology** 193: 274-288.

Ren, B., W.Q Zhong, B.S Jin, Z.L Yuan. and Y. Lu. 2011. Computational fluid dynamics (CFD)-discrete element method (DEM) simulation of gas-solid turbulent flow in a cylindrical spouted bed with a conical base. **Energy and Fuels** 25(9): 4095-4105.

Ren, B., Y. Zhong, Chen, X, Chen., B, Jin., Z, Yuan. and Y, Lu. 2012. CFD- DEM simulation of spouting of corn-shaped particles. **Particuology** 10: 562-572.

Rong, L. and J, Zhan, 2010. Improved DEM-CFD model and validation: A conical-base spouted bed simulation study. **Journal of Hydrodynamics Series B** 22(3): 351-359.

Takeuchi, S., X.S. Wang. and M. J. Rhodes. 2005. Discrete element study of particle circulation in a 3-D spouted bed, **Chemical Engineering Science** 60: 1267-1276.

Takeuchi, S., X.S. Wang and M.J. Rhodes. 2008. Discrete element method simulation of three-dimensional conical-base spouted beds. **Powder Technology** 184(2): 141-150.

Tsuji, Y.,T. Tanaka. and T. Kawaguchi. 1998. Numerical simulation of two-dimensional fluidized beds using the discrete element method (Comparison between the two- and three-dimensional models), **Powder Technology** 96: 129-138.

Wei, H., L. Zan, Y. Li. Z., Wang. H. Saxén, and Y. Yu. 2017. Numerical and experimental studies of corn particle properties on the forming of pile. **Power Technology** 321: 533-543.

Yu, H., W. Cheng, H. Wang, H. Peng, and Y. Xie. 2017. Formation mechanisms of a dust-removal air curtain in a fully-mechanized excavation face and an analysis of its dust-removal performances based on CFD and DEM. **Advanced Powder Technology** 28(11): 2830-2847.

Zhou, Z.Y, D. Pinson, R.P. Zou. and A.B. Yu. 2011. Discrete particle simulation of gas fluidization of ellipsoidal particles. **Chemical Engineering Science** 66(23): 6128–6145.

การออกแบบกลไก Scotch Yoke เพื่อควบคุมแผ่นบังคับความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิกส์ต้นแบบแบบระบายความร้อนลง

Design of Scotch Yoke Mechanism for Damper Blade Control for Downdraft Ceramic Kiln Prototype

สิทธิโชค สืบแต่ตระกูล[1] และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์[1*]

Sittichoke Subteatakul[1] and Taweedej Sirithanapipat[1*]

บทคัดย่อ

ปัญหาที่เกิดจากเตาเผาเซรามิกส์ คือการควบคุมบรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์ให้เป็นการเผาแบบบรรยากาศออกซิเดชันอยู่ตลอดเวลาเพื่อที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดีแต่ในความเป็นจริงอาจทำได้ยากเนื่องจากมีหลายสาเหตุที่ทำให้บรรยากาศการเผาเป็นรีดักชันแต่สาเหตุหลักที่ส่งผลอย่างมากต่อการควบคุมบรรยากาศการเผาเตาเซรามิกส์ให้เป็นออกซิเดชันอยู่ตลอดเวลาคือ การปรับแผ่นบังคับความร้อน (damper blade) เพื่อให้ได้บรรยากาศการเผาตามที่ต้องการ การเลื่อนแผ่นบังคับความร้อนนี้จะมีผลต่อบรรยากาศการเผาภายในเตาโดยจะให้เป็นออกซิเดชันหรือรีดักชันถือเป็นกระบวนการที่สำคัญในการควบคุมบรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์ บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบกลไกควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นบังคับความร้อนโดยใช้หลักการของ Scotch Yoke Mechanism เพื่อให้เกิดบรรยากาศการเผาเตาเซรามิกส์ตามที่ต้องการรวมถึงประหยัดแรงงานที่เกิดจากคน ลดต้นทุนในการผลิต ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดีขึ้นและสนับสนุนการออกแบบระบบอัติโนมัติควบคุมการเผาเซรามิกส์ในอนาคตต่อไป

ABSTRACT

In firing ceramic kiln an oxidation firing is need to oxidation for a better of the products. Reduction firing is the main reason unstable products to is not easy to reduction firing condition for an downdraft ceramic kiln. Traditional to control oxidation firing the damper blade to be move for get reduce of exhaust gas to maintain complete combustion firing condition ceramic kiln. This paper is discuss about the design mechanism to promote apply the scotch yoke mechanism to damper blade. The purpose automatic damper blade moving is to reduce the laborer cost and make good quality of products the automatic control firing condition in ceramic kiln development concept.

Key words: firing condition, oxidation, reduction, damper blade, quick-return mechanism

* Corresponding author; e-mail address: taweedej.s@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

เตาเผาเซรามิกส์ถือเป็นหัวใจสำคัญในกระบวนการผลิตเซรามิกส์เพราะผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ผ่านขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนผลิตมาอย่างดีแล้วจะไม่สามารถเรียกได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกส์หากไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาเพราะฉะนั้นแล้วกระบวนการเผาจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงาน ในกระบวนการเผานั้นจะถูกแบ่งออกเป็น กระบวนการแบบออกซิเดชัน หรือบรรยากาศการเผาแบบออกซิเดชัน (Oxidation Firing) และกระบวนการเผาแบบรีดักชัน หรือบรรยากาศการเผาแบบรีดักชัน (Reduction Firing) บรรยากาศการเผามีความสำคัญอย่างมาก เพราะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีภาชนะของชิ้นงาน สีออกไซด์ในการเคลือบ ถ้าเป็นการเผาแบบออกซิเดชัน คือการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ซึ่งเกิดจากบรรยากาศในเตามีออกซิเจนมากเกินพอ และเมื่อเผาไหม้แล้วจะมีออกซิเจนเหลืออยู่ ลักษณะการเผาแบบนี้คือ สะอาด ไม่มีควัน โลหะออกไซด์ซึ่งเป็นสารให้สีในเนื้อดินและในน้ำเคลือบไม่ถูกดึงออกซีเจนไปใช้ในกระบวนการเผา เพราะมีออกซิเจนมากพอแล้ว ดังนั้นสีของชิ้นงานจึงเป็นสีของโลหะออกไซด์ เช่น สีทองแดง หรือ สีเขียวของทองแดง ส่วนการไหม้แบบรีดักชันหรือบรรยากาศการเผาแบบรีดักชัน คือ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ในเตามีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง เมื่อเผาไหม้แล้วจะมีคาร์บอนมอนออกไซด์เหลืออยู่ในเตา เป็นการเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงสูง ภายในเตาจะทำให้อากาศเข้าไปในเตาน้อยกว่า ทำให้ภายในเตามีออกซิเจนไม่เพียงพอ จึงส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะเกอดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เมื่อมีออกซิเจนในการเผาน้อยก็จะได้สีแดงของคอปเปอร์ออกไซด์หรือสีดำแดงออกมา ส่งผลให้เกิดผลเสียกับชิ้นงาน การเผาแบบรีดักชันนี้เป็นการเผาต่อเนื่องจากการเผาแบบออกซิเดชันคือเริ่มทำการปรับบรรยากาศการเผาโดยใช้แผ่นบังคับความร้อน โดยจะปรับแผ่นบังคับความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เพื่อลดบรรยากาศการเผารีดักชันให้เป็นการเผาแบบออกซิเดชันต่อไป

หน้าที่ของแผ่นบังคับความร้อนของเตาเผาเซรามิกส์เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการการเผามีความสำคัญอย่างมากและมีผลต่อชิ้นงานเซรามิกส์อย่างมาก เพราะความผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมแผ่นบังคับความร้อน จะเป็นผลให้ชิ้นงานต่างๆเกิดความเสียหาย ในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่เตาเผาเซรามิกส์แบบระบายความร้อนลงเป็นหลัก (Figure 1) แผ่นบังคับความร้อนที่ติดตั้งที่ปล่องของเตาเผาเซรามิกส์แบบระบายความร้อนลง (Figure 2)

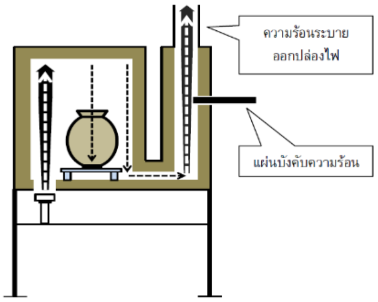


Figure1 direction of exhaust gas downdraft kiln.

Figure2 the damper blade for ceramic ceramics downdraft kiln.

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาทางด้านคิเนมาติกส์และออกแบบกลไกแบบ Scotch Yoke ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นบังคับความร้อน โดยมีเป้าหมายเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นกลไกสำหรับควบคุมบรรยากาศการเผาในเตาเผาเซรามิกส์ สามารถที่จะลดการเกิด Reduction Firing ซึ่งมีผลต่อคุณภาพ

ของชิ้นงานและทำให้การเผาในเตาเป็นการเผาแบบ Oxidation Firing ทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพที่ดีขึ้น ลดแรงงานในกระบวนการเผา ลดต้นทุนในการผลิตและเพื่อเตรียมการสำหรับการควบคุมเตาเผาเซรามิกส์แบบอัตโนมัติต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัย จึงได้วางแผนดำเนินงานวิจัยเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. **การศึกษาการทำงานของแผ่นบังคับความร้อนที่มีผลต่อบรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์**

การศึกษาในข้อนี้เป็นการศึกษาหน้าที่ความสำคัญของแผ่นบังคับความร้อนที่มีผลต่อบรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์ รวมถึงผลกระทบภายในเตาเผาเซรามิกส์เมื่อมีการปรับแผ่นบังคับความร้อนเลื่อนเปิด-ปิด เพื่อหาระยะชักสูงสุด (Stroke) ของแผ่นบังคับความร้อนเพื่อมาออกแบบกลไก Scotch Yoke

2. **การศึกษาคิเนมาติกส์ของกลไก** Scotch Yoke

คิเนมาติกส์ (Kinematics) ของกลไก Scotch Yoke เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ ที่สัมพันธ์กับชิ้นส่วนของกลไกรวมกันเป็นหลักการทำวานของกลไกและความสามารถในการไหวของกลไก (Mobility) ที่มีระดับความเป็นอิสระในการเคลื่อนไหว (Degree of Freedom, DOF) ที่กลไกมีอยู่ โดยทำการศึกษาจากสมการของ Grubler ดังนี้

$$M = 3(\mathrm{n}-1) - 2\,\mathrm{g}_1 - 2g_2 \qquad (1)$$

เมื่อ M คือ จำนวน DOF, n คือ จำนวนก้านต่อเชื่อมกลไก, g_1 คือ จำนวนข้อต่อที่มี DOF=1, g_2 คือ จำนวนข้อต่อที่มี DOF=2 การวิเคราะห์กลไก เมื่อกลไกมีการเคลื่อนไหวจะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ความเร็วสูงสุด ความเร่งสูงสุดขึ้นระหว่างการทำงาน โดยทำการศึกษาจากสมการการเคลลื่อนที่แบบ Simple Harmonic Motion (S.H.M.) ของกลไก Scotch Yoke ดังนี้

$$X = R\cos(\theta) \qquad (2)$$

$$V = R\omega\sin(\theta) \qquad (3)$$

$$a = -R\omega^2\cos(\theta) \qquad (4)$$

เมื่อ X คือ การเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)

V คือ ความเร็ว (มิลลิเมตรต่อวินาที)

a คือ ความเร่ง (มิลลิเมตรต่อวินาที^{2})

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (รอบต่อวินาที)

3. **การออกแบบ พัฒนากลไก** Scotch Yoke **ร่วมกับแผ่นบังคับความร้อนในการเผาเตาเซรามิกส์**

เพื่อให้กลไกสามารถควบคุมแผ่นบังคับความร้อนเลื่อนเปิด-ปิดได้ จึงได้มีการออกแบบจำลองการติดตั้งกับปล่องแก็สไอเสียของเตาเผาเซรามิกส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ รวมถึงการออกแบบเงื่อนไขการทำงานของกลไกบังคับความร้อนเพื่อให้สอดคล้องกับบรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาการทำงานของแผ่นบังคับความร้อนที่มีผลต่อบรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์

แผ่นบังคับความร้อน (Damper) คือ แผ่นอิฐทนไฟที่สอดใส่ไว้ในช่องทางที่ความร้อนจะระบายออกขึ้นสู่ปล่อง โดยแผ่นอิฐนี้จะเป็นตัวบังคับให้ความร้อนไหลออกจากเตาได้ช้าหรือเร็ว ซึ่งจะนิยมใช้กับเตาเผาเซรามิกส์แบบระบายความร้อนลง (Drown Draft Kiln) การเลื่อนแผ่นบังคับความร้อนนี้จะมีผลต่อบรรยากาศการเผาภายในเตาด้วย โดยจะให้เป็นแบบออกซิเดชันหรือรีดักชันก็ได้ รวมถึงการเลื่อนแผ่นบังคับความร้อนเข้า-ออก เป็นผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันภายในเตาเผาเซรามิกส์ด้วย เมื่อเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆจะทำให้ความดันภายในเตาเผาเซรามิกส์สูงขึ้น จำเป็นที่จะต้องมีการเลื่อนดแผ่นบังคับความร้อนออกจากปล่องแก็นไอเสียเพื่อเป็นการระบายความดันภายในเตาเผาออกสู่บรรยากาศ

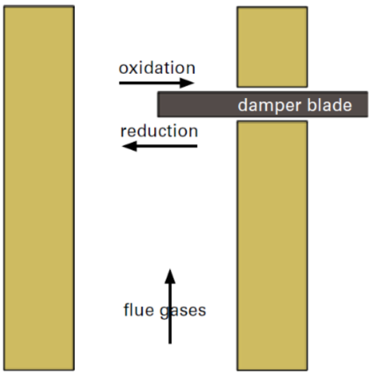


Figure 3 Controlling the heat control plate to allow the exhaust gas from the ceramic kiln to change the atmosphere into oxidation-reduction.

วิธีการเผาแบบบรรยากาศออกซิเดชันกับเตาชัทเทิล (Shuttle Kiln) ที่ใช้แก็สเป็นเชื้อเพลิงโดยการเผานั้นจะมีหลักการอยู่ว่าจะต้องทำให้บรรยากาศการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างสมบูรณ์โดยมีกาซออกซิเจนอย่างเพียงพอหรือมากเกินพอซึ่งทำได้ โดยการเปิด-ปิด แผ่นบังคับความร้อนของเตาให้หมด ซึ่งจะต้องทำการปรับหัวพ่นไฟ (Burner) ให้เกิดการเผาไหม้โดยเร็วพอที่จะไล่แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ให้หลุดออกจากเตาไปโดยเร็วที่สุด พร้อมกับการตรวจสอบโดยการวัดความดันแก๊สภายในเตาเผาโดยดูมาโนมิเตอร์ (Manometer) ความดันของแก๊สจะต้องเป็นลบ

2. ผลการศึกษาคิเนมาติกส์ของกลไก Scotch Yoke

การศึกษาคิเนมาติกส์ (Kinematics) ของกลไก Four-Bar-Linkage แบบ Scotch Yoke พบว่า กลไก Scotch Yoke มีส่วนประกอบของก้านต่อเชื่อม (Linkage) 4 ก้านต่อเชื่อม ซึ่งประกอบด้วยก้านต่อเชื่อม 1 เป็นโครงยึด ก้านต่อเชื่อม 2 และก้านต่อเชื่อม 4 เป็นข้อเหวี่ยงหรือตัวโยก ส่วนก้านต่อเชื่อมที่ 3 เป็นก้านส่งกำลัง ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของก้านต่อเชื่อมทั้ง 4 ก้านต่อเชื่อม ที่สัมพันธ์กันทำให้กลไกนั้นสามารถทำงานให้เป็นจังหวะได้ พบว่าก้านต่อเชื่อม 1 ไม่มีการเคลื่อนที่เป็นโครงยึดหรือโครงสร้าง (Structure) สำหรับประคองยึดกลไก

ก้านต่อเชื่อม 2 มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบการหมุน (Rotation) จะมีระยะห่างจากเส้นตรงที่ตั้งฉากกับระนาบการเคลื่อนที่ ซึ่งเส้นตรงนี้จะเป็นแกนหมุน ก้านต่อเชื่อม 3 จะประกอบติดอยู่บนก้านต่อเชื่อม 2 มีการเคลื่อนที่แบบวงกลมตามก้านต่อเชื่อม 2 และเคลื่อนที่ขึ้น-ลง อยู่ในร่อง (Slot) ของก้านต่อเชื่อม 4 เพื่อส่งกำลังไปขับก้านต่อเชื่อม 4 และก้านต่อเชื่อม 4 มีลักษณะการเคลื่อนที่ตาวแนวระนาบ (Plane Motion) แบบเชิงเส้น (Rectilinear Translation) โดยเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตลอด เมื่อรวมการทำงานของก้านต่อเชื่อมทั้ง 4 ก้านเชื่อมต่อแล้ว กลไกจะมีหลักการทำงานแบบเปลี่ยนการหมุนเป็นการเคลื่อนที่แบบชักไป-ชักกลับ ในแนวเส้นตรงที่มีความเร่งเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับระยะทางที่เคลื่อนที่หรือเป็นการเคลื่อนที่แบบ Simple Harmonic Motion และผลของการศึกษาความสามารถการเคลื่อนไหวของกลไกที่มีระดับความเป็นอิสระในการเคลื่อนไหว (Degree of Freedom ,DOF) พบว่า กลไกมี DOF=1 ซึ่งเป็นกลไกแบบบังคับ (Constrained Mechanism) มีทิศทางการเคลื่อนที่แบบถูกบังคับไว้อย่างแน่นอน เมื่อออกแบบกลไก Scotch Yoke และจำลองคิเนมาติกส์ของกลไก Scotch Yoke ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง Yoke ผ่านโปรแกรมช่วยในการออกแบบโดยกำหนดให้จานเหวี่ยงของกลไกมีความเร็วรอบที่แตกต่างกันออกไปและนำค่าต่างๆจากการจำลองมาศึกษาวิเคราะห์หาการเคลื่อนที่สูงสุด ความเร็วสูงสุด ความเร่งสูงสุด ระหว่างการทำงานของกลไกจากสมการ Simple Harmonic Motion (S.H.M) ผลการจำลองคิเนมาติกส์ของกลไก Scotch Yoke จะแสดงใน Table 1,2,3 และ Figure 4,5,6

Table 1 simulation result maximum displacement, maximum velocity, maximum acceleration of Scotch Yoke mechanism for various motor spee

Motor Speed	List	Angle (deg)			
		90	180	270	360
5 RPM	Maximum Displacement (mm)	0	-180	0	180
	Maximum Velocity (mm/s)	-47	0	47	0
	Maximum Acceleration (mm/s^2)	0	25	0	-25
10 RPM	Maximum Displacement (mm)	0	25	0	-25
	Maximum Velocity (mm/s)	0	-180	0	180
	Maximum Acceleration (mm/s^2)	-94	0	94	0
15 RPM	Maximum Displacement (mm)	0	-180	0	180
	Maximum Velocity (mm/s)	-141	0	141	0
	Maximum Acceleration (mm/s^2)	0	222	0	222

หมายเหตุ : (-) หมายถึง การเคลื่อนที่ชักกลับของกลไก Scotch Yoke

(+) หมายถึง การเคลื่อนที่ชักไปข้างหน้าของกลไก Scotch Yoke

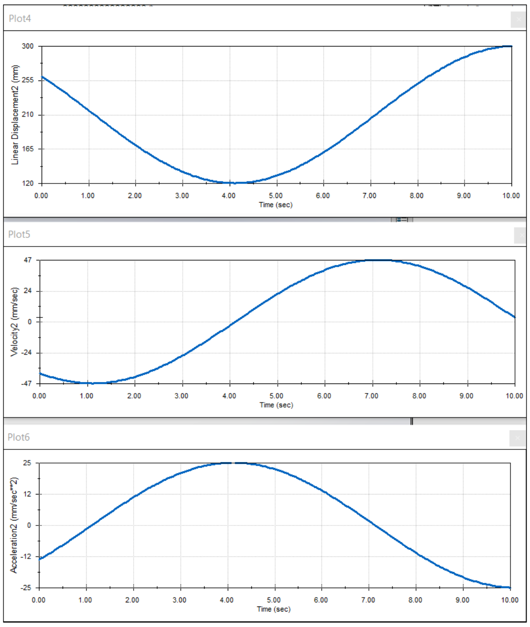


Figure 4 Displacement Velocity Acceleration plot with respect to time @ Motor Speed 5 RPM.

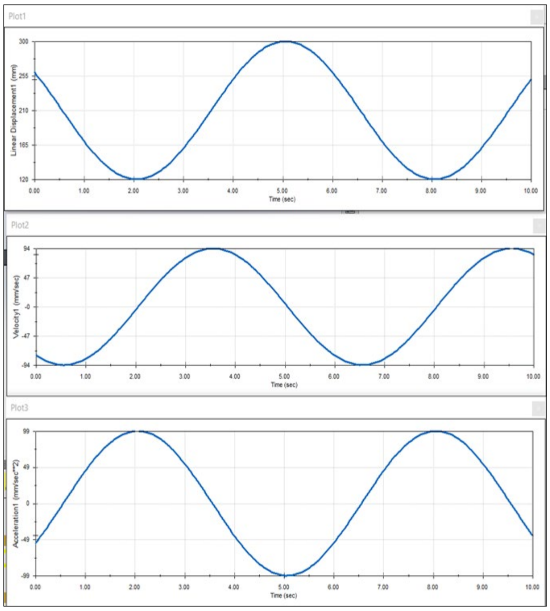


Figure 5 Displacement Velocity Acceleration plot with respect to time @ Motor Speed 10 RPM.

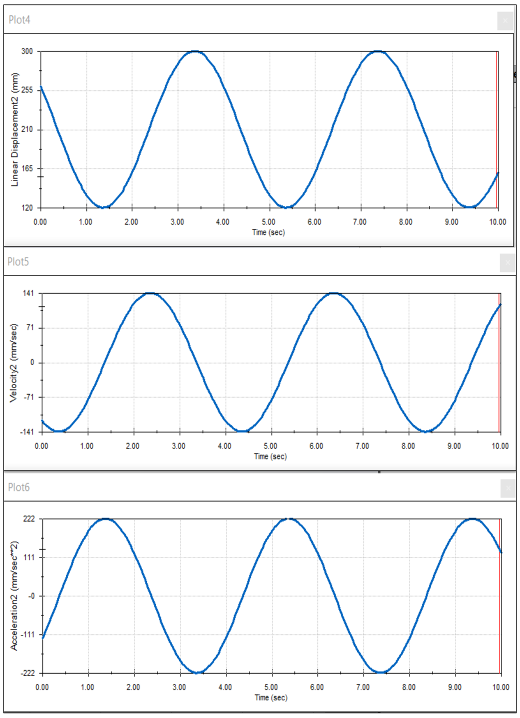


Figure 6 Displacement Velocity Acceleration plot with respect to time @ Motor Speed 15 RPM.

จาก-Table 1 และ Figure 4 จะเป็นการจำลองที่ความเร็วรอบ 5RPM พบว่าต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ของระยะชัก (Stroke) 180 mm ภายใน 6 วินาที

จาก -Table 1 และ Figure 5 จะเป็นการจำลองที่ความเร็วรอบ 10RPM พบว่าต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ของระยะชัก (Stroke) 180 mm ภายใน 3 วินาที

จาก-Table 1 และ Figure 6 จะเป็นการจำลองที่ความเร็วรอบ 15RPM พบว่าต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ของระยะชัก (Stroke) 180 mm ภายใน 2 วินาที

เมื่อเปรียบเทียบกับงานจริงในการดึงแผ่นบังคับความร้อนจะอยู่ที่ประมาณ วินาที ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ ความเร็ว 3 10 รอบของจานข้อเหวี่ยงอยู่ที่RPM

3. ผลการออกแบบ พัฒนากลไก Scotch Yoke ร่วมกับแผ่นบังคับความร้อนในการเผาเตาเซรามิกส์

จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 1 และ 2 เพื่อมาออกแบบกลไก Scotch Yoke ติดตั้งกับปล่องแก๊สไอเสียของเตาเผาเซรามิกส์แสดงใน Figure 7

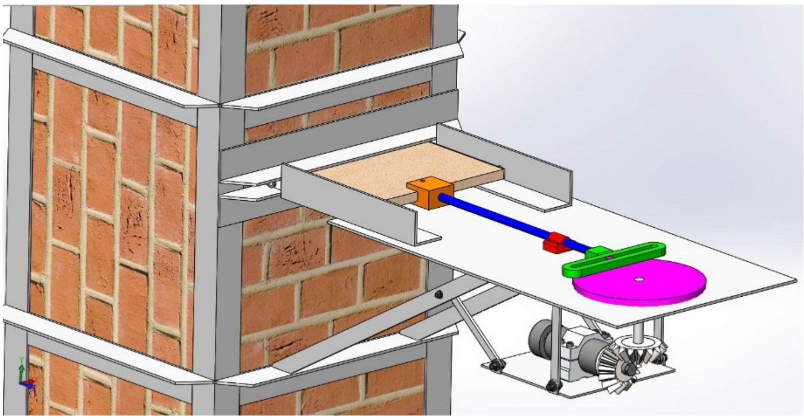


Figure 7 damper blade control mechanism design concept.

การออกแบบกลไกควบคุมแผ่นบังคับความร้อนมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะควบคุมบรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์ให้เป็นบรรยากาศการเผาออกซิเดชันหรือรีดักชัน แต่เนื่องจากการเผาที่เป็นแบบรีดักชันคือการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์จะส่งผลเสียต่อคุณภาพชิ้นงาน เพราะภายในเตาเผามีก๊าซออกซิเจนไม่เพียงพอ จึงทำให้เกิดเขม่าควันและก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ขึ้นภายในเตาเผา ซึ่งการเผาบรรยากาศแบบรีดักชันนี้อุณหภูมิความร้อนจะขึ้นช้ากว่าการเผาแบบออกซิเดชัน ดูจาก Figure8 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่จะเปลี่ยนแปลงค่อยๆช้าลงโดยจะสังเกตอยู่ที่ประมาณ 950-1100 องศาเซลเซียส เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงเป็นตัวที่บ่งชี้การเกิดบรรยากาศรีดักชันภายในเตาเผาเซรามิกส์ได้รวมถึงก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ก็สามารถเป็นตัวบ่งชี้การเกิดรีดักชันได้เช่นกัน

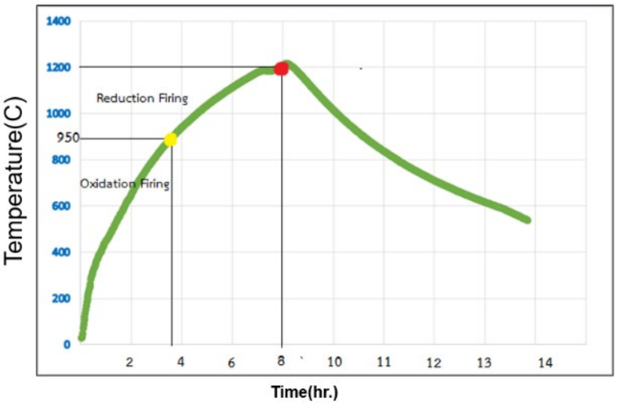


Figure 8 Experimented Temperature profile of ceramic downdraft kiln at Lampang.

เมื่อทราบถึงสาเหตุของการเกิดรีดักชันภายในเตาเผาเซรามิกส์ การแก้บรรยากาศการเผารีดักชันให้กลับมาเป็นออกซิเดชันคือการเลื่อนแผ่นบังคับความร้อนเพื่อให้ระบายแก็สไอเสียออกจากปล่องจึงทำให้มีออกซิเจนเข้ามาแทนที่ใหม่จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นนั้นก็คือการเผาแบบออกซิเดชัน ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบควบคุมกลไกแผ่นบังคับความร้อนให้สอดคล้องกับบรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์ แสดงใน Figure 9

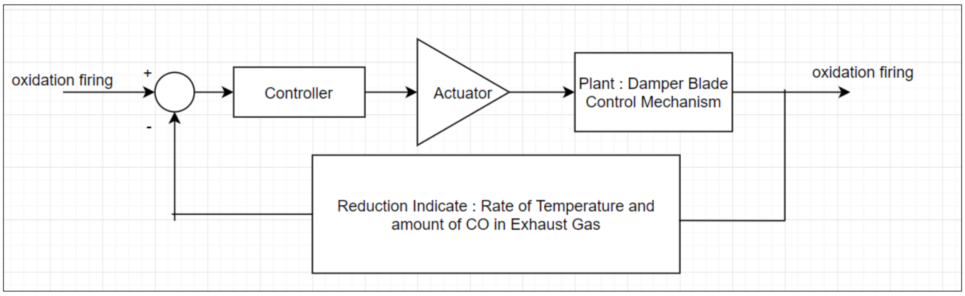


Figure 9 Concept Block Diagram Control Oxidation Firing in Ceramic Kiln.

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาทั้ง 3 การศึกษาพบว่าแผ่นบังคับความร้อนมีผลต่อบรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์สามารถปรับบรรยากาศการเผาได้ทั้งออกซิเดชันและรีดักชัน และออกแบบกลไกเพื่อบังคับการเคลื่อนที่ของแผ่นบังคับความร้อนโดยศึกษาคิเนมาติกส์ของกลไก Scotch Yoke โดยผ่านคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบความเร็วของแผ่นจาน 10 รอบต่อนาที มีความเร็วสูงสุด 94 มิลลิเมตรต่อวินาทีและมีความเร่งสูงสุด99 มิลลิเมตรต่อวินาที การออกแบบกลไกเพื่อควบคุมแผ่นบังคับความร้อนนี้มีจุดประสงค์ในการควบคุมบรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์ โดยศึกษาพฤติกรรมการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์พบว่าข้อบ่งชี้ที่ทำให้เกิดรีดักชันคืออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเซรามิกส์เริ่มลดลง และปริมาณของ คาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) เริ่มเพิ่มขึ้น เมื่อตรวจพบข้อบ่งชี้เหล่านี้ จึงมีการปรับแผ่นควบคุมความร้อนเพื่อให้บรรยากาศการเผาภายในเตาเผาเซรามิกส์กลับสู่ออกซิเดชันเหมือนเดิม จากการศึกษาทั้ง 3 ผลการศึกษามีวัตถุประสงค์ในการออกแบบกลไกควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นบังคับความร้อนโดยใช้หลักการของ Scotch Yoke Mechanism เพื่อให้เกิดบรรยากาศการเผาเตาเซรามิกส์ตามที่ต้องการ รวมถึงประหยัดแรงงานที่เกิดจากคน ลดต้นทุนในการผลิต ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดีขึ้นและสนับสนุนการออกแบบระบบอัติโนมัติควบคุมการเผาเซรามิกส์ในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนการวิจัยแผนงานพัฒนาบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563

เอกสารอ้างอิง

สิทธิโชค สืบแต่ตระกูล และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ . 2562. **การศึกษาทดลองเปรียบเทียบของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์**, งานประชุมวิชาการมหาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 57 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 504-511.

Bunyakiat, K. 2001. **Fuel and Combustion**. Chulalongkorn University Press, Bangkok

Ceramic Industrial Development, Center. 1999. **Training Documents of Kiln Firing for Ceramics**. Ceramic Industrial Development Center, Lampang.

การศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

A Performance Study of A Stirling Engine

เผชิญ จันทร์สา[1*] อดุลย์ พัฒนภักดี[1] และ วิทยา พันธุ์เจริญศิลป์[1]

Pachern Jansa[1*], Adual Pattanapakdee[1], Vitthaya Phunjareonsilp[1]

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการทดลองหาสมรรถนะเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยได้ประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบและระยะชักของลูกสูบทั้ง 2 ชุดเท่ากันที่ 20 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความยาวก้านสูบของลูกสูบฝั่งรับความร้อนเท่ากับ 79 มิลลิเมตร ความยาวก้านสูบของลูกสูบฝั่งระบายความร้อนเท่ากับ 58 มิลลิเมตร ใช้ความร้อนจากเปลวไฟของหัวเผาเครื่องเชื่อมแก๊สเป็นแหล่งให้ความร้อน การทดลองพบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเริ่มหมุนได้เมื่ออุณหภูมิกระบอกสูบฝั่งรับความร้อนเท่ากับ 248 องศาเซลเซียส ความแตกต่างอุณหภูมิผิวกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่ง มีค่า 109 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงเท่ากับ 352 รอบต่อนาที และที่สภาวะคงตัวอุณหภูมิผิวกระบอกสูบฝั่งรับความร้อนเท่ากับ 305 องศาเซลเซียส ความแตกต่างอุณหภูมิผิวกระบอกสูบเท่ากับ 137.5 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงเท่ากับ 789 รอบต่อนาที วิเคราะห์กำลังบ่งชี้สูงสุดได้เท่ากับ 85 วัตต์ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนคาร์โนท์เฉลี่ยเท่ากับ 44.5 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

This paper presents an experimental study to evaluate the performance of the artificial stirling engine. The alpha type of a small stirling engine has been fabricated with bore and stroke of both of hot cylinder and cold cylinder are 20 mm and 30 mm respectively. For the connecting rod length, there are 79 mm for the hot cylinder and 58 mm for the cold cylinder. A frame of the burner of a gas welding machine is used as the heat source for the artificial stirling engine. The results show that the artificial stirling engine can start continually cranking with the speed of 352 rpm at the outside temperature surface of hot cylinder is 248 °C and the surface temperature difference between hot and cold cylinder is about 109 °C. The artificial stirling engine can operate to the maximum speed about 789 rpm with the outside temperature surface of hot cylinder is 305 °C and the surface temperature difference between hot and cold cylinder is 137.5 °C. The calculation can be found that the indicated power of the artificial stirling engine is 85 W and the average thermal efficiency is 44.5 %

Key words :stirling engine, power of engine, thermal efficiency

*Corresponding author; e-mail address :**pachern.ja@spu.ac.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมระบบเครื่องกลและนวัตกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Mechanical System and Innovative Industrial Engineering, School of Engineering, Sripatum University, Bangkok 10900

บทนำ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling engine) เป็นเครื่องยนต์ระบบปิด 2 จังหวะ ที่ประกอบด้วยชุดลูกสูบและกระบอกสูบ 2 ชุด เชื่อมช่องทางเดินก๊าซถึงกัน ได้แก่ชุดลูกสูบ-กระบอกสูบรับความร้อนและชุดลูกสูบ-กระบอกสูบระบายความร้อน ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Robert Stirling (ค.ศ. 1790-1878) เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอก ทำให้การประยุกต์ใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในและสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายประเภท เช่น ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม แหล่งความร้อนใต้พิภพ หรือความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่ให้งานออกมาโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิของก๊าซในระบบที่ทำหน้าที่เป็นของไหลทำงาน ความร้อนที่ป้อนให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะทำให้ก๊าซในระบบมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น เกิดการขยายตัวของกระบอกสูบดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ได้งานออกมาที่เพลาข้อเหวี่ยง

การศึกษานี้มีแนวคิดในการออกแบบและประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กขึ้นมาเนื่องจากเป็นรูปแบบที่มีอัตราส่วนของกำลังงานต่อปริมาตรสูง โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายสำหรับใช้ศึกษาเชิงทดลองหาสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานความร้อนภายนอกที่เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกอื่นๆ ที่หลากหลายต่อไป

การออกแบบและคำนวณ

การประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็ก

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กที่จะออกแบบเพื่อประดิษฐ์ขึ้นสำหรับการศึกษาและทดลองหาสมรรถนะนั้น เป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในรูปแบบแอลฟา ซึ่งจะมีตำแหน่งการทำงานของลูกสูบฝั่งเย็น (ฝั่งระบายความร้อน) กับลูกสูบฝั่งร้อน (ฝั่งรับความร้อน) ต่างกัน 90 องศา (Figure 1) ชุดกระบอกสูบฝั่งร้อนและชุดกระบอกสูบฝั่งเย็นจะติดตั้งทำมุมตั้งฉากกัน โดยก้านสูบของชุดลูกสูบทั้ง 2 ฝั่งจะมีจุดต่อเชื่อมกับเพลาข้อเหวี่ยงที่จุดเดียวกัน

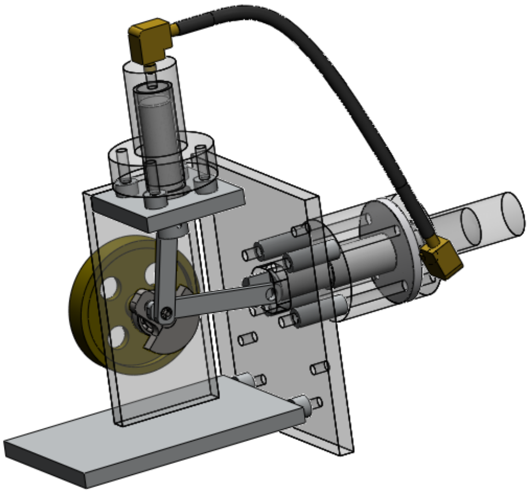


Figure 1 Graphic design of an artificial alpha type of a small stirling engine.

ปริมาตรกระบอกสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้น จะเป็นปริมาตรของกระบอกสูบ 2 กระบอกสูบรวมกัน ดังนั้นการพิจารณาหาปริมาตรมากสุดและปริมาตรน้อยสุดจึงต้องพิจารณาตำแหน่งของลูกสูบทั้งสองฝั่งไปพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถหาปริมาตรกระบอกสูบมากสุดและน้อยสุดได้จากสภาวะการทำงานที่สัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของก๊าซในกระบอกสูบ ซึ่งการหาปริมาตรมากสุดในกระบอกสูบพิจารณาขณะลูกสูบฝั่งเย็นอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (Figure 2) และปริมาตรน้อยสุดในกระบอกสูบได้พิจารณาขณะลูกสูบฝั่งเย็นอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน (Figure 3)

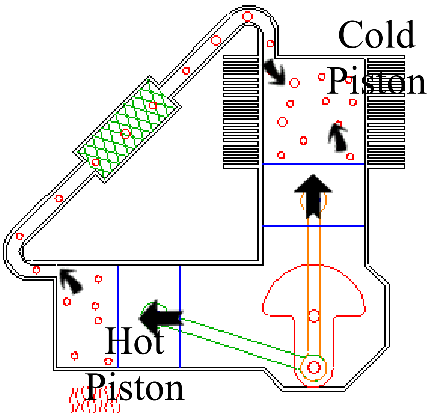


Figure 2 The state with maximum volume.

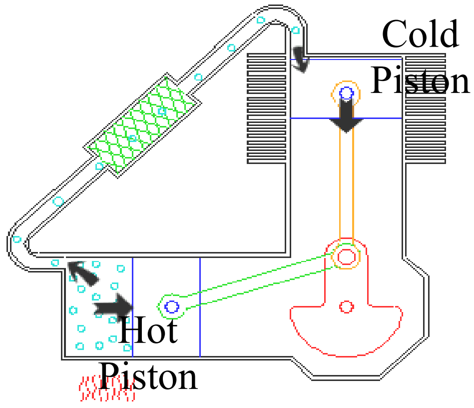


Figure 3 The state with minimum volume.

Source: http://www.animatedengines.com/

ปริมาตรรวมในกระบอกสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถหาได้จาก $V = V_H + V_L$ โดยที่ V_H คือ ปริมาตรของกระบอกสูบฝั่งร้อน และ V_L คือ ปริมาตรของกระบอกสูบฝั่งเย็น ปริมาตรมากสุดในกระบอกสูบจะเป็นตำแหน่งที่ลูกสูบฝั่งร้อนมีระยะชักเท่ากับ L/2 และลูกสูบฝั่งเย็นมีระยะชักเท่ากับ L (Figure 2) ซึ่งจะได้ $V_{max} = V_H + V_L = \frac{\pi d^2 (L/2)}{4} + \frac{\pi d^2 (L)}{4}$ โดยที่ d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ และ L คือ ขนาดระยะชักของลูกสูบ ส่วนปริมาตรน้อยสุดในกระบอกสูบจะเป็นตำแหน่งที่ลูกสูบฝั่งร้อนมีระยะชักเท่ากับ L/2 แต่ลูกสูบฝั่งเย็นมีระยะชักเป็นศูนย์ (Figure 3) ซึ่งจะได้ $V_{min} = V_H = \frac{\pi d^2 (L/2)}{4}$ โดยจะได้อัตราส่วนการอัดเท่ากับ $r_c = \frac{V_{max}}{V_{min}}$

หลังจากการออกแบบเชิงกราฟิกด้วยคอมพิวเตอร์แล้ว ก็ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็ก (Figure 4) เพื่อใช้สำหรับการศึกษาและทดลองหาสมรรถนะ โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นมีชิ้นส่วนต่างๆผลิตขึ้นจากอะลูมิเนียม ยกเว้นชุดปลอกกระบอกสูบและลูกสูบที่ใช้ชุดหลอดแก้วของกระบอกฉีดยาซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบทั้ง 2 ชุดเป็น 20 mm และมีขนาดรัศมีของเพลาข้อเหวี่ยงเท่ากับ 15 mm ส่วนความยาวก้านสูบของชุดลูกสูบฝั่งร้อนมีค่าเท่ากับ 79 mm และความยาวก้านสูบของชุดลูกสูบฝั่งเย็นมีค่าเท่ากับ 58 mm

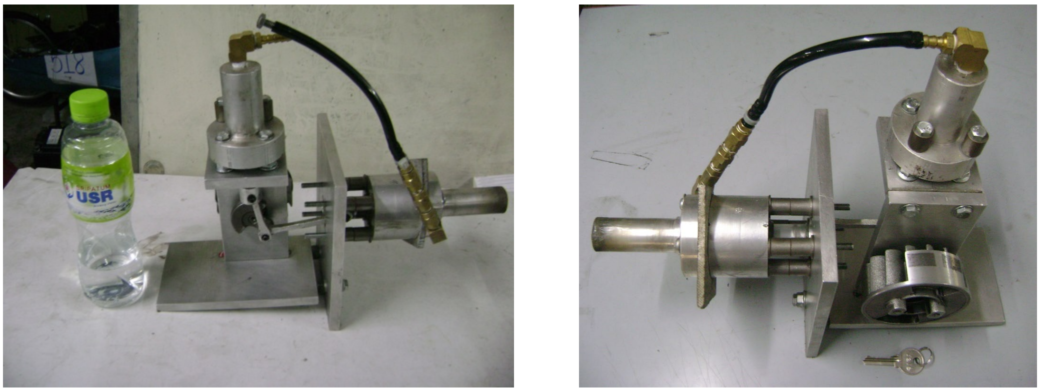


Figure 4 The artificial alpha type of a small stirling engine.

การคำนวณหากำลังงานและประสิทธิภาพของเครื่องสเตอร์ลิง

ความดันในกระบอกสูบสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้กฎของก๊าซอุดมคติ PV = mRT โดยที่ R คือค่าคงที่ของก๊าซ m คือมวลของก๊าซ = ρV_{max})ρ คือความหนาแน่นของอากาศ) และ T คืออุณหภูมิของก๊าซในกระบอกสูบ

การทำงานของวัฏจักรสเตอร์ลิงประกอบด้วย 4 กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการอุณหภูมิคงที่ 2 กระบวนการและกระบวนการปริมาตรคงที่ 2 กระบวนการ ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตร (P-V diagram) และอุณหภูมิกับเอนโทรปี (T-S diagram) ของก๊าซในกระบอกสูบ (Figure 5)

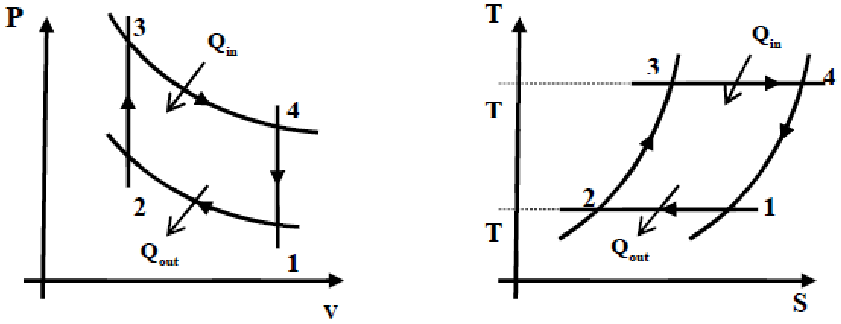


Figure 5 P-V and T-S diagram of a stirling cycle.

การพิจารณาหาอุณหภูมิและความดันของก๊าซในกระบอกสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในแต่ละสถานะนั้น สามารถวิเคราะห์ตามกระบวนการดังนี้

กระบวนการที่1 $\longrightarrow$ 2เป็นการอัดตัวแบบกระบวนการอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Compression Process) ซึ่งจากสมการก๊าซอุดมคติ (สมการที่ 3) โดยที่ $T_2 = T_1$ จะได้ว่า $P_1V_1 = P_2V_2$ หรือ $P_2 = P_1 \times r_c$

กระบวนการที่ 2$\longrightarrow$ 3เป็นการให้ความร้อนแบบกระบวนการปริมาตรคงที่ (Heat Addition at Constant Volume Process) จากสมการก๊าซอุดมคติ โดยที่ $V_3 = V_2$ จะได้ $\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$ หรือ $P_3 = T_3 \times \frac{P_2}{T_2}$

กระบวนการ 3$\longrightarrow$ 4เป็นการขยายตัวแบบกระบวนการอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Expansion Process) จากสมการก๊าซอุดมคติ โดยที่ $T_4 = T_3$ จะได้ว่า $P_3V_3 = P_4V_4$ หรือ $P_4 = P_3 \times \frac{1}{r_c}$

และประสิทธิภาพเชิงความร้อนคาร์โนท์ของวัฏจักรสเตอร์ลิง $\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

กำลังงานบ่งชี้ที่ได้จากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงงานในกระบอกสูบอันเนื่องมาจากการขยายตัวและหดตัวของก๊าซซึ่งเป็นสารทำงานที่มีการได้รับและสูญเสียความร้อนในระหว่างวัฏจักร กำลังงานที่เกิดขึ้นในขณะใดขณะหนึ่งสามารถหาได้จากความดันภายในกระบอกสูบที่เปลี่ยนเป็นแรงกระทำกับลูกสูบให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วขณะนั้นตามสมการ $\dot{P}_{stir} = F \times \overline{S}_p$ โดยที่ F คือแรงกระทำกับลูกสูบ (F = P x A_c เมื่อ A_c คือพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ ($\overline{S}_p$ คือความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบ ($\overline{S}_p = 2LN$ เมื่อ N คือความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง(

กำลังงานบ่งชี้สูงสุดที่ได้จะเกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบมีค่าสูงสุด ณ ขณะลูกสูบเคลื่อนถึงตำแหน่งกึ่งกลางของระยะชัก (ตำแหน่งของมุมเพลาข้อเหวี่ยงมีค่าเท่ากับ 90 องศา (ซึ่งความดันของกระบอกสูบที่นำมาคิดแรงกระทำกับลูกสูบจะเป็น $P_{3.5} = P_3 \times \frac{2}{r_c}$

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้น จะทำการทดลองให้ความร้อนกับชุดกระบอกสูบฝั่งรับความร้อนโดยใช้เปลวไฟจากเครื่องเชื่อมแก๊ส จากนั้นจะทำการวัดอุณหภูมิผิวด้านนอกของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่งไปเรื่อยๆพร้อมๆกับการใช้มือคอยหมุนเพลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เมื่อเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเริ่มหมุนได้เองต่อเนื่องหลังจากการใช้มือช่วยหมุน ก็จะเริ่มจดบันทึกข้อมูลอุณหภูมิผิวด้านนอกของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่ง และค่าความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงที่วัดได้จากเครื่องวัดความเร็วรอบทุกๆ 0.5 นาที

Figure 6 Experimental test of the artificial alpha type of small stirling engine.

ผลการทดลอง

จากการทดลองการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้น สามารถแสดงผลการวัดอุณหภูมิผิวกระบอกสูบและความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงที่ได้ดังต่อไปนี้ (Table 1)

Table 1 Experimental results of the artificial alpha type of small stirling engine.

Time (min)	T_H (°C)	T_L (°C)	*N* (rpm)
0	240	136.0	0
0.5	248	139.0	352
1.0	256	143.0	370
1.5	264	147.0	374
2.0	269	149.5	384
2.5	278	154.0	471
3.0	283	156.5	522
3.5	291	160.5	618
4.0	295	162.5	652
4.5	299	164.5	768
5.0	305	167.5	789

จากผลทดลอง (Table 1) พบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กแบบแอลฟาที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถเริ่มทำงานเองได้เมื่ออุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งร้อนมีค่าเท่ากับ 248 °C และอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งเย็นมีค่าเท่ากับ 139 °C ซึ่งสามารถวัดความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงได้เท่ากับ 352 rpm จากนั้นเมื่อให้ความร้อนไปเรื่อยๆจะส่งผลให้อุณหภูมิผิวของกระบอกสูบแต่ละฝั่งมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยผลต่างอุณหภูมิผิวของ 2 กระบอกสูบเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงก็มีค่าเพิ่มขึ้นตาม จากนั้นการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะเข้าสู่สภาวะคงตัวในสภาพแวดล้อมขณะทำการทดลอง โดยมีค่าอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งร้อนสูงสุดเท่ากับ 305 °C มีอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งเย็นสูงสุดเท่ากับ 167.5 °C และมีค่าความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงสูงสุดเท่ากับ 789 rpm และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาคำนวณหาอุณหภูมิและความดันของก๊าซในกระบอกสูบในแต่ละสถานะเพื่อวิเคราะห์หากำลังงานและประสิทธิภาพตลอดช่วงเวลาของการทดสอบ (Table 2) เมื่อนำค่าความเร็วรอบการหมุนเพลาข้อเหวี่ยงและแรงกระทำกับลูกสูบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับค่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างสองกระบอกสูบ (Figure 7, Figure 8) จะเห็นว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิกระบอกสูบเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงในช่วงแรกหลังจากเริ่มหมุน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งความแตกต่างของอุณหภูมิมีค่าถึงประมาณ 120 °C จึงจะเริ่มทำให้ความเร็วรอบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็นแนวโน้มของฟังก์ชันของกราฟเส้นโค้ง ในส่วนของแรงกระทำกับลูกสูบนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างของอุณหภูมิกระบอกสูบเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กันเป็นฟังก์ชันของกราฟเส้นตรง และเมื่อพิจารณา

กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานเทียบกับค่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างสองกระบอกสูบ (Figure 9) พบว่ามีความสัมพันธ์กันเป็นฟังก์ชันของกราฟเส้นโค้งเช่นเดียวกับกราฟของความเร็วรอบการหมุนเพลาข้อเหวี่ยง

จากนั้นเมื่อนำกำลังงานและประสิทธิภาพมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง จะเห็นว่ากำลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะความสัมพันธ์แบบกราฟเส้นตรงตามค่าความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น ส่วนประสิทธิภาพเชิงความร้อนนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่แม้ความเร็วรอบจะมีค่าเพิ่มขึ้น (Figure 10)

Table 2 Calculation results of the artificial alpha type of small stirling engine.

Time (min)	ΔT (°C)	N (rps)	$P_{3.5}$ (kPa)	F (N)	$\overline{S}_p$ (m/s)	$\dot{P}_{stir}$ (W)	η_{th} (%)
0	104	0.0	322.9	101.4	0.00	0.0	43.3
0.5	109.0	5.9	327.1	102.7	0.35	36.2	44.0
1.0	113.0	6.2	331.3	104.0	0.37	38.5	44.1
1.5	117.0	6.2	333.8	104.8	0.37	39.2	44.3
2.0	119.5	6.4	338.5	106.3	0.38	40.8	44.4
2.5	124.0	7.9	341.1	107.1	0.47	50.4	44.6
3.0	126.5	8.7	345.3	108.4	0.52	56.6	44.7
3.5	130.5	10.3	347.3	109.1	0.62	67.4	44.8
4.0	132.5	10.9	349.4	109.7	0.65	71.5	44.9
4.5	134.5	12.8	352.5	110.7	0.77	85.0	45.0
5.0	137.5	13.2	-	-	-	-	45.1

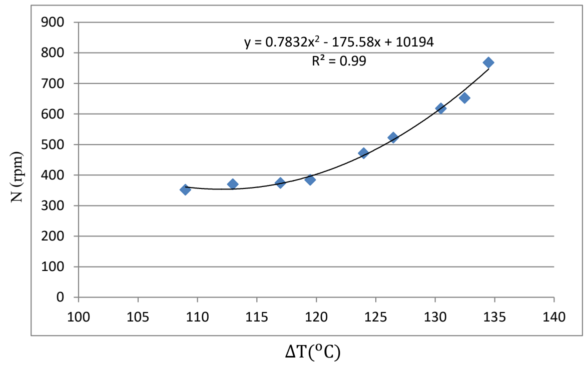


Figure 7 Crank speed compared to cylinder surface temperature difference.

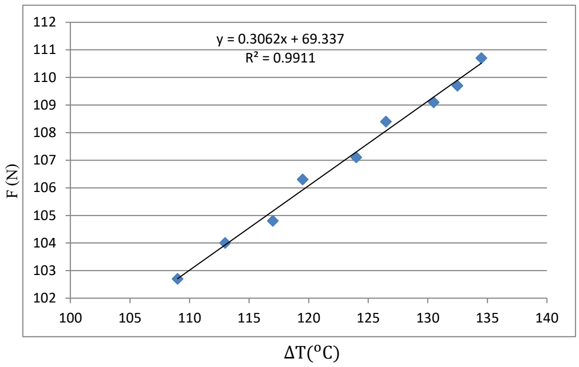
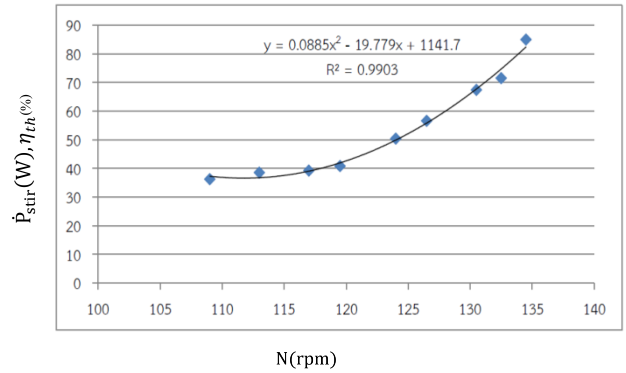


Figure 8 Force exert on piston compared to cylinder surface temperature difference.



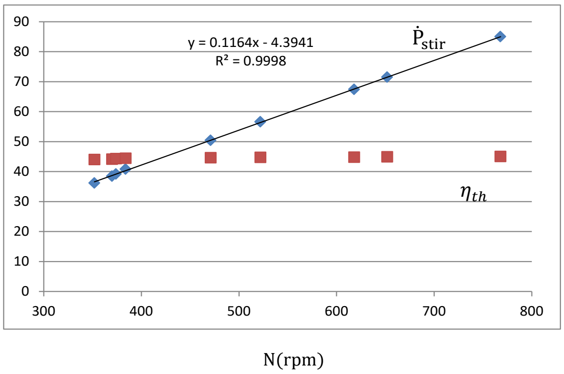


Figure 9 Power compared to cylinder surface temperature difference.

Figure 10 Power and thermal efficiency compared to crank speed.

สรุป

จากการประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กขึ้นมา พบว่าสามารถนำมาใช้ทดสอบการทำงานได้โดยใช้แหล่งความร้อนภายนอกจากเปลวไฟของเครื่องเชื่อมแก๊ส ผลการทดสอบการทำงานพบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเองอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วรอบการหมุนเพลาข้อเหวี่ยงเท่ากับ 352 rpm เมื่ออุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งร้อนมีค่าเท่ากับ 248 °C ด้วยผลต่างของอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่งเท่ากับ 109 °C และมีการทำงานเข้าสู่สภาวะคงตัวในสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิผิวของกระบอกสูบฝั่งร้อนมีค่าเท่ากับ 305 °C ด้วยผลต่างของอุณหภูมิผิวของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่งเท่ากับ 137.5 °C โดยมีค่าความเร็วรอบการหมุนเพลาข้อเหวี่ยงสูงสุดเท่ากับ 789 rpm จากผลการคำนวณและวิเคราะห์สมรรถนะพบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นมีความเร็วรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันของกราฟเส้นโค้งเช่นเดียวกับกราฟของกำลังงานเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของผลต่างอุณหภูมิผิวกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่ง ในขณะที่แรงจากความดันก๊าซภายในกระบอกสูบที่กระทำกับลูกสูบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเส้นตรงเมื่อเทียบกับผลต่างอุณหภูมิผิวกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นมีผลการวิเคราะห์กำลังงานบ่งชี้สูงสุด 85 W ที่ความเร็วรอบ 768 rpm และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนคาร์โนท์เฉลี่ยเท่ากับ 44.5 %

อย่างไรก็ตามแรงกระทำกับลูกสูบที่นำไปวิเคราะห์หากำลังงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาขนาดเล็กนั้น เป็นผลการคำนวณที่ได้จากค่าความดันซึ่งประเมินจากวัฏจักรการทำงานทางทฤษฎีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (แม้จะอ้างอิงจากอุณหภูมิที่ได้จากการวัดในการทดสอบจริงก็ตาม) ดังนั้นในหากจะมีการศึกษาต่อไปอาจมีการติดตั้งเครื่องวัดความดันที่สามารถบอกค่าความดันของก๊าซในกระบอกสูบได้ชัดเจนเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มาจากข้อมูลของการทดสอบจริงทั้งหมด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะนักศึกษาสาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีปทุม ได้แก่ นายดิฐพูม ชิณบุตร นายสิทธิชัย นาควิไล และนายจิรายุทธ องอาจ ที่ช่วยเหลือในประดิษฐ์ชิ้นงาน การทดสอบและเก็บข้อมูลสำหรับการศึกษานี้ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่มีส่วนสนับสนุนการนำเสนอบทความในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

บัณฑิต ลิ้มมีโชคชัย เผชิญ จันทร์สา และจำนง สรพิพัฒน์. 2549. ศักยภาพเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ในประเทศไทย. *ใน* **รายงานการประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่** 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

สมพจน์ คำแก้ว และ บัญชา ค้งตระกูล. 2558. การทบทวนต้นแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาจากเครื่องอัดอากาศ. **วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยราชมงคลตะวันออก** 8(1): 58 - 65

Stirling engine (Online). https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine, November15, 2019

Two Cylinder Stirling Engine (Online). http://www.animatedengines.com/, November15, 2019

การวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของโครงการแหล่งน้ำขนาดเล็ก กรณีศึกษาจังหวัดอุทัยธานี

Ranking Analysis of Small Scale Water Resources Project: A Case Study of Uthaithani Province

ภาณุวัฒน์ ศรีชัย[1] ดีบุญ เมธากุลชาติ [1]วีระเกษตร สวนผกา[1]

Panuwat Srichai[1] Deeboon Methakullachat[1] Weerakaset Suanpaga[1]

บทคัดย่อ

จังหวัดอุทัยธานีเป็นต้นกำเนิดของน้ำหลายสายก็ตามแต่ในช่วงฤดูฝนจะเกิดน้ำน้ำท่วมซ้ำซากเกือบทุกปี และในช่วงฤดูแล้งไม่สามารถเก็บกักน้ำไว้ใช้ประโยชน์ได้ โครงการแหล่งน้ำขนาดเล็กจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะแก้ปัญหาในพื้นที่ โดยได้ทำการศึกษาความเหมาะสมของโครงการแต่ละโครงการตามที่ราษฎรในพื้นที่ร้องขอเพื่อประเมินราคาค่าก่อสร้างและพื้นที่รับประโยชน์ที่เหมาะสมกับโครงการ แต่เนื่องด้วยโครงการที่ราษฎรร้องขอในแต่ละปีนั้นมีจำนวนมากกว่างบประมาณที่รัฐบาลสนับสนุน ดังนั้นการจัดลำดับความสำคัญของโครงการจึงเป็นเครื่องมือที่นำมาวิเคราะห์หาลำดับความสำคัญของแต่ละโครงการ ในการศึกษานี้ได้นำผลการศึกษาโครงการเบื้องต้นในพื้นที่จังหวัดอุทัยธานีจำนวน 25 โครงการ นำมาวิเคราะห์อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (B/C Ratio) เพื่อจัดลำดับความสำคัญ ผลวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.22 ถึง 2.18 โดยมีโครงการที่มีค่าอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนมากกว่า 1 จำนวน 8 โครงการ ซึ่งถือว่าเป็นโครงการที่มีความเหมาะสมและสมควรให้ดำเนินการก่อสร้างในลำดับต้นตามผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์โครงการ

ABSTRACT

Uthaithani is always repetitiously flooded in the rainy season almost every year and unable to store the water for utilization in the dry season. Thus, a small scale water resource project plan is one of the ways to solve these problems. The researchers had studied the appropriateness of project that requested by local people to estimate the construction cost and gainful area which proper with the project. Since the budget supported by the government was insufficient with requested projects each year, so the project priority arrangement was a tool of analysis to propose a better alternative. The data was collected from the study result of 25 basic projects in Uthaithani to analyze the benefit-cost ratio (B/C Ratio) for arranging the priority. The result of benefit-cost ratio valued between 0.22-2.18. The projects which valued over 1 consist of 8 projects that mean there are appropriate to conduct the basic construction as an analysis result of project economic field.

Key words: engineering economy, ranking, B/C ratio

* Corresponding author; e-mail address: panuwatwm66@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Infrastructure Engineering and Management, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

จังหวัดอุทัยธานี ตั้งอยู่ภาคเหนือตอนล่าง บริเวณลุ่มน้ำสะแกกรัง ซึ่งไหลสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ที่อำเภอมโนรมย์ จังหวัดชัยนาท มีพื้นที่ทั้งหมด 6,730 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 4,206,404 ไร่ เป็นพื้นที่ทางการเกษตร 1,378,219 ไร่ และพื้นที่ป่าที่มีสภาพเป็นพื้นที่คุ้มครอง ได้แก่ ป่าสงวนแห่งชาติ 9 แห่ง วนอุทยาน 2 แห่ง เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า 1 แห่ง เขตห้ามล่าสัตว์ป่า 1 แห่ง มีเนื้อที่รวม 2,828,185 ไร่ สภาพภูมิประเทศโดยทั่วไปเป็นป่าและภูเขามีความลาดเทจากทิศตะวันตก ลงมาทางทิศตะวันออก โดยทิศตะวันออกเป็นเทือกเขาสลับซับซ้อน พื้นที่ตอนกลางเป็นดอนสลับพื้นที่ราบแบบลูกคลื่นด้นทิศตะวันออกของจังหวัด พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบลุ่ม จังหวัดอุทัยธานีเป็นต้นกำเนิดของลำน้ำหลายสาย ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพทางการเกษตร จากลักษณะพื้นที่ดังกล่าวทำให้จังหวัดอุทัยธานีประสบกับปัญหาขาดแคลนน้ำ และหากปีใดน้ำมากหรือน้ำหลากจะเกิดน้ำท่วมเป็นประจำ เนื่องจากไม่มีโครงการแหล่งน้ำหรืออาคารกั้นน้ำที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวพอเพียง จากปัญหานี้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องเช่นกรมชลประทาน ได้ทำการศึกษาหาความเหมาะสมและความเป็นไปได้ของโครงการแหล่งน้ำขนาดใหญ่ หรือขนาดกลาง เพื่อให้ราษฎร ได้ใช้ประโยชน์ โดยมีการก่อสร้างอ่างเก็บน้ำทับเสลาเป็นโครงการขนาด และจากการศึกษาจากแผนที่ของกรมแผนที่ทหารมาตรส่วน 1: 50,000 พิกัดและระวางที่ตั้งโครงการบางโครงการ อยู่ในเขตพื้นที่ที่กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กำหนดเป็นพื้นที่อนุรักษ์ต้นน้ำลำธาร ชั้น 1A ซึ่งห้ามกระทำการก่อสร้างใดๆ ในเขตตามมติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2538 และสาเหตุอีกประการหนึ่งของปัญหาในการก่อสร้างโครงการแหล่งน้ำขนาดใหญ่และขนาดกลางคือ ต้องเสียพื้นที่ทำกินของราษฎรมากมักจะเกิดปัญหาราษฎรไม่ยินยอมให้ทำการก่อสร้าง เพราะราษฎรบางรายมีพื้นที่ทำกินน้อยและราษฎรรักถิ่นฐาน แต่ในขณะที่โครงการแหล่งน้ำขนาดเล็กใช้พื้นที่ก่อสร้างน้อยระยะเวลาก่อสร้างสั้น และก่อสร้างในสถานที่ที่ราษฎรต้องการตามความจำเป็น

โครงการแหล่งน้ำขนาดเล็กจึงเป็นแนวทางที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวซึ่งในปัจจุบันจังหวัดอุทัยธานีมีแผนงานโครงการแหล่งน้ำน้อยมากและหน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้องก็ไม่ได้ทำการศึกษาหรือวางแผนเพื่อพัฒนาโครงการแหล่งน้ำขนาดเล็กครอบคลุมพื้นที่ทั้งจังหวัดอุทัยธานี การวางแผนเพื่อพัฒนาโครงการมีขั้นตอนดำเนินการ ด้านวิศวกรรมด้านการเงินและเศรษฐศาสตร์ จัดลำดับตามความเหมาะสมของโครงการ เพื่อใช้เป็นแนวทางที่หน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้อง

วัตถุประสงค์

เพื่อจัดลำดับความสำคัญของโครงการแหล่งน้ำขนาดเล็กในเขต จังหวัดอุทัยธานี

ขอบเขตการศึกษา

ในการศึกษาตามโครงการนี้ ศึกษาเฉพาะด้านความเหมาะสมของโครงการแหล่งน้ำขนาดเล็กเพื่อทำการวางแผนจัดการโครงการเพื่อก่อสร้างแหล่งน้ำผิวดินขนาดเล็กให้กับราษฎร โดยขอบเขตการศึกษาครั้งนี้ศึกษาเฉพาะความต้องการโครงการแหล่งน้ำขนาดเล็ก ในเขต จังหวัดอุทัยธานี สรุปผลการศึกษาเพื่อจัดลำดับความสำคัญโครงการแหล่งน้ำขนาดเล็กของ จังหวัดอุทัยธานี

ระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัย

พื้นที่ศึกษา

จังหวัดอุทัยธานี ซึ่งมีพื้นที่ทั้งสิ้น 4,206,404 ไร่ ซึ่งต้องประสานงานกับจังหวัด อำเภอ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ผู้นำชุมชน หน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้อง และเกษตรกรในพื้นที่ ในการพิจารณาแก้ไขปัญหาในส่วนที่เกี่ยวกับงานด้านส่งน้ำให้แก่พื้นที่เพาะปลูก ดำเนินการก่อสร้างงานตามแผนพัฒนาระบบส่งน้ำ ระบบระบายน้ำ ตลอดจนปฏิบัติงานอื่นๆ ตามที่ผู้บังคับบัญชามอบหมาย

แผนงานที่มีความพร้อมสำหรับโครงการก่อสร้าง ในเขตจังหวัดอุทัยธานีที่ได้มีการศึกษาวางโครงการเบื้องต้นพบว่ามี 25 โครงการ อยู่ในเขตพื้นที่ อ.เมือง 1 โครงการ อ.ทัพทัน 4 โครงการ อ.บ้านไร่ 7 โครงการ อ.ลานสัก 5 โครงการ และ อ.สว่างอารมณ์ 8 โครงการ โดยแสดงรายละเอียดดัง Table 1 และ Figure 1-2

วิธีการศึกษา

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล โดยเป็นข้อมูลจากแผนงานของโครงการก่อสร้าง สำนักงานชลประทานที่ 12 ที่มีผลการพิจารณาโครงการที่มีความพร้อม จากฝ่ายพิจารณาโครงการ ส่วนวิศวกรรม สำนักงานชลประทานที่ 12 มาใช้ในการวิเคราะห์

2. การวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อได้ผลพิจารณาโครงการที่ต้องการแล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์คำนวนรายละเอียดด้านวิศวกรรมด้านเศรษฐศาสตร์ ด้วยการวิเคราะห์โครงการโดยการหาค่า Benefit- Cost Ratio โดยอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefits – Cost Raito : B/C ratio)

อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน คือ มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวมหารด้วย
มูลค่าปัจจุบันของ ต้นทุนรวม ซึ่งผลประโยชน์จะเกิดขึ้นตลอดอายุทางเศรษฐกิจของโครงการแม้ว่า
การลงทุนจะผ่านพ้นไปแล้ว ในขณะที่ต้นทุนการก่อสร้างจะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงการลงทุนเท่านั้น
ส่วนต้นทุนที่อยู่ในรูปของค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน การบำรุงรักษา และทดแทนอุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพจะเกิดขึ้นตลอดช่วงอายุโครงการ ดังนั้น เมื่อนำเอากระแสผลประโยชน์และต้นทุนของโครงการที่ปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันแล้วมาเปรียบเทียบกัน ก็จะได้มูลค่าของ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน ซึ่งอาจจะได้ขนาดเท่ากับหนึ่ง มากกว่าหนึ่ง หรือน้อยกว่าหนึ่งแล้วแต่กรณี

$$\text{B/C ratio} = \text{PVB/PVC}$$

$$= \frac{\sum_{t=1}^{n} B_t (1+r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{n} C_t (1+r)^{-t}}$$

เกณฑ์การตัดสินใจที่แสดงว่าโครงการมีความเหมาะสมและคุ้มค่า คือ B/C ratio $\geq$ 1

2.1 ผลประโยชน์ของโครงการ (Benefit) ได้จากผลต่างก่อนและหลังก่อสร้างของผลตอบแทนของผลผลิตต่อไร่คูณพื้นที่รับประโยชน์ โดยหากโครงการใดมีศักยภาพเก็บน้ำได้ในฤดูแล้งตามผลพิจารณาโครงการจะมีค่าผลตอบแทนเพิ่มจากพื้นที่รับประโยชนในฤดูแล้งด้วย

2.2 หาค่ามูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม (PVB) โดยนำผลประโยชน์โครงการที่หาได้จากข้อ 2.1 มาคิดเป็นผลประโยชน์รายปี ระยะเวลา 20 ปี ตามอายุของอาคาร ที่อัตราคิดลดร้อยละ 12

มูลค่าปัจจุบันสุทธิบ่งชี้ถึงจำนวนผลประโยชน์สุทธิที่ได้รับตลอดระยะเวลาของโครงการ ซึ่งอาจจะมีค่าเป็นลบ ศูนย์ หรือบวก ขึ้นอยู่กับขนาด (Magnitude) ของมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม (PVB) หักด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม (PVC) ของโครงการ

$$NPV = PVB - PVC$$

$$= \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}$$

โดยที่ Bt หมายถึง ผลประโยชน์ของโครงการในปีที่ t

Ct หมายถึง ต้นทุนของโครงการในปีที่ t

r หมายถึง อัตราคิดลดหรืออัตราดอกเบี้ย

t หมายถึง ระยะเวลาของโครงการ (1, 2,..,n)

เกณฑ์ในการตัดสินใจ โครงการจะมีความเหมาะสมก็ต่อเมื่อ NPV > 0 หรือมีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายถึง มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวมมีค่ามากกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม (PVB > PVC)

2.3 ต้นทุนโครงการ (Cost) อ้างอิงจากการประมาณการเบื้องต้นจากผลพิจารณาโครงการ โดยฝ่ายพิจารณาโครงการ ส่วนวิศวกรรม สำนักงานชลประทานที่ 12 นำมาใช้เป็นค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม (PVC)

3. เรียงลำดับความสำคัญของโครงการตามค่า Benefit- Cost Ratio ที่ได้ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา แล้วอภิปรายสรุปผลการศึกษา

Table 1 Table of regional irrigation office 12 construction projects planning information.

No.	Project name	Sub-district	District	Province	Construction cost (MBath)	Benefit area (rai)	
						Wet	Dry
1	Ban Dong Weir	Khok Khwai	Ban Rai	Uthai Thani	22.0000	500	
2	Moo 8 Nuan Ma Ka Weir	Nam Rop	Lan Sak	Uthai Thani	30.0000	1,200	
3	Don Sawat Regulator	Hu Chang	Ban Rai	Uthai Thani	32.0000	600	
4	Ban Noi Regulator	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	40.0000	500	
5	Ban Phai Khiao 2 Regulator	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	50.0000	1,500	
6	Huib E Keng Regulator	Taluk Du	Thap Than	Uthai Thani	40.0000	500	500
7	Beung Kum Sub Pumping Station	Ko Thepho	Mueang	Uthai Thani	200.0000	1,500	1,500
8	Nong Jik Yao Culvert	Taluk Du	Thap Than	Uthai Thani	15.0000	500	400
9	San Pho Pu Culvert	Taluk Du	Thap Than	Uthai Thani	21.0000	500	
10	Ban Klong Mai Lai Weir	Rabam	Lan Sak	Uthai Thani	11.3640	400	400
11	Ban Don Sai Weir	Bo Yang	Sawang Arom	Uthai Thani	13.0000	500	500
12	Wong Hin Weir	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	28.0000	400	
13	Phu Ta Lit Weir	Hu Chang	Ban Rai	Uthai Thani	19.0000	500	
14	Ban Mai Weir	Khok Khwai	Ban Rai	Uthai Thani	32.0000	2,500	
15	Wong luang Weir	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	18.0000	1,000	500
16	Lan Ka Weir	Nong Bom Kluai	Ban Rai	Uthai Thani	18.0000	300	
17	Klong Lek Weir	Bo Yang	Sawang Arom	Uthai Thani	17.0000	1,000	500
18	Huai Dua Weir	Thap Luang	Ban Rai	Uthai Thani	28.0000	1,000	
19	Huai Phu Ta Kian Weir	Nong Chok	Ban Rai	Uthai Thani	18.0000	300	
20	Koh Klang Culvert	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	15.0000	500	300
21	Wong Toei Culvert	Taluk Du	Thap Than	Uthai Thani	15.0000	500	500
22	Luang Pho Wicha Regulator	Pa O	Lan Sak	Uthai Thani	50.0000	3,000	
23	Ban Klong Cha Nee Bon Reservoir	Pa O	Lan Sak	Uthai Thani	50.0000	1,500	
24	Ban Wong Na San Weir	Pradu Yuen	Lan Sak	Uthai Thani	20.0000	500	500
25	Ban Klong Lam Pang Weir	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	20.0000	500	

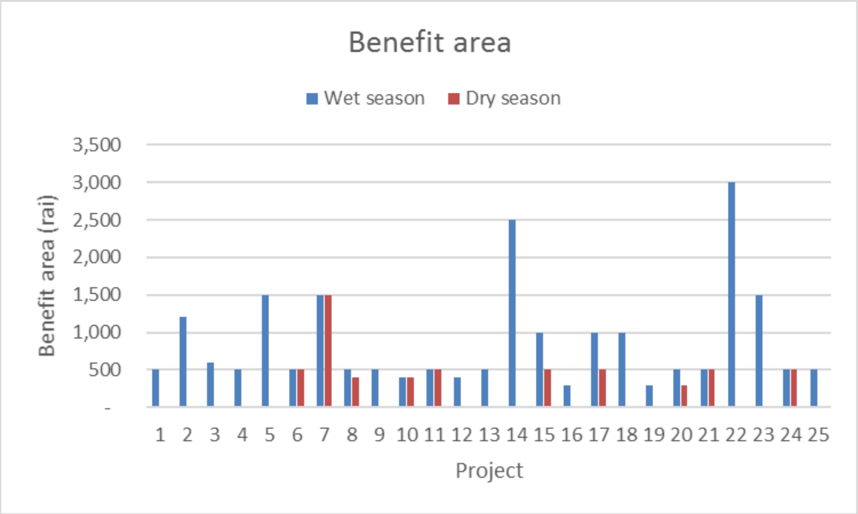


Figure 1 Graph of Benefit area.

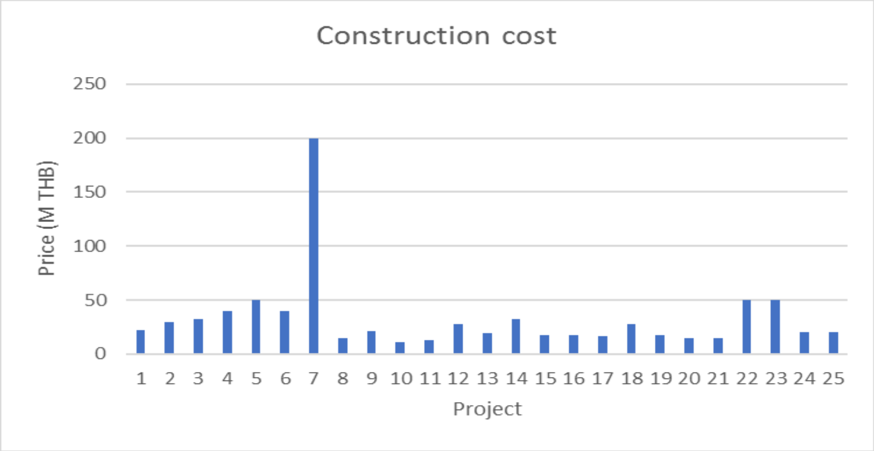


Figure 2 Graph of construction cost.

ผลการศึกษาและวิจารณ์

แผนงานที่มีความพร้อมสำหรับโครงการก่อสร้าง ในเขตจังหวัดอุทัยธานีที่ได้มีการศึกษาวางโครงการเบื้องต้นพบว่ามี 25 โครงการ อยู่ในเขตพื้นที่ อ.เมือง 1 โครงการ อ.ทัพทัน 4 โครงการ อ.บ้านไร่ 7 โครงการ อ.ลานสัก 5 โครงการ และ อ.สว่างอารมณ์ 8 โครงการ มีผลศึกษาจำแนกตามอำเภอดังนี้

1. อำเภอเมืองอุทัยธานี จังหวัดอุทัยธานี จำนวน 1 โครงการ ราคาค่าก่อสร้าง 200 ล้านบาท พื้นที่รับประโยชน์ 1,500 ไร่ มีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน เท่ากับ 0.25

2. อำเภอทัพทัน จังหวัดอุทัยธานี จำนวน 4 โครงการ ราคาค่าก่อสร้างอยู่ในช่วง 15-40 ล้านบาท พื้นที่รับประโยชน์ 500 ไร่ ทุกโครงการมีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน เท่ากับ 0.43-1.16

3. อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี จำนวน 7 โครงการ ราคาค่าก่อสร้างอยู่ในช่วง 18-32 ล้านบาท พื้นที่รับประโยชน์ 300-2,500 ไร่ ทุกโครงการมีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน เท่ากับ 0.22-2.18

4. อำเภอลานสัก จังหวัดอุทัยธานี จำนวน 5 โครงการ ราคาค่าก่อสร้างอยู่ในช่วง 11-50 ล้านบาท พื้นที่รับประโยชน์ 400-3,000 ไร่ ทุกโครงการมีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน เท่ากับ 0.421-.22

5. อำเภอสว่างอารมณ์ จังหวัดอุทัยธานี จำนวน 8 โครงการ ราคาค่าก่อสร้างอยู่ในช่วง 13-50 ล้านบาท พื้นที่รับประโยชน์ 400-1,500 ไร่ ทุกโครงการ มีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน เท่ากับ 0.40-1.34

ทั้งนี้ในการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดเล็กของสนักงานชลประทานที่ 12 สามารถสร้างรายได้เพิ่มขึ้นให้กับเกษตรกรในทุกโครงการ เพียงแต่ค่าก่อสร้างของแต่ละงานนั้นอาจมีค่ามากกว่าผลผระโยชน์ที่จะได้รับจึงทำให้ได้ค่า B/C Ratio มีค่าต่ำกว่า 1

โดยผลการวิเคราะห์อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนทั้ง 25 โครงการแสดงรายละเอียดดัง Figure 3

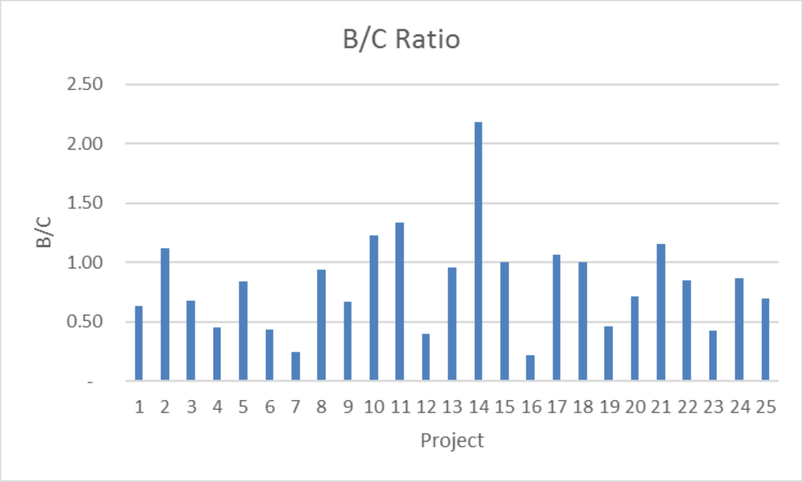


Figure 3 Graph of Benefit-Cost Ratio.

สรุปผลและเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนทั้ง 25 โครงการ นำมาจัดลำดับความสำคัญจากข้อมูลเบื้องต้นจากสำคัญมากไปหาสำคัญน้อย ซึ่งค่าอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนมีค่าสูงสุด 2.18 และต่ำสุด 0.22 ซึ่งโครงการที่เหมาะสมต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1 และโครงการที่มีค่าอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนมากกว่า 1 จำนวน 8 โครงการ คิดเป็นร้อยละ 32 ของโครงการทั้งหมดที่ต้องการ และโครงการที่มีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนน้อยกว่า 1 จำนวน 17 โครงการ คิดเป็นร้อยละ 68 ของความต้องการของจังหวัดอุทัยธานี ดัง Table 2

จากตารางการวิเคราะห์อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนและจัดลำดับความสำคัญของโครงการข้างต้น จะเห็นได้ว่าบางโครงการมีค่า B/C ไม่ถึง 1 แสดงว่าไม่มีความเหมาะสมในการก่อสร้าง ในด้านเศรษฐศาสตร์ คือ ไม่คุ้มทุน แต่ในด้านสังคมจะมาตีราคาเป็นเงินไม่ได้ เพราะถ้าไม่มีโครงการราษฎรมีความเดือดร้อนจริงและเป็นสิ่งที่ราษฎรมีความต้องการในสังคม ถ้าเกิดโครงการแล้วราษฎร์สามารถทำการเกษตร ซึ่งเป็นอาชีพหลักได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น รายได้เพิ่ม มีความอยู่ดีกินดี ภาวะจิตใจก็แจ่มใสอยู่ในสังคมด้วยความสงบสุข โดยการก่อสร้างโครงการเหล่านี้เกษตรที่ได้รับความเดือดร้อนจะจะทำหนังสือขอรับการสนับสนุนถึงสำนักชลประทานที่ 12 ผ่านองค์การปกครองส่วนท้องถิ่น

Table 2 Table of benefit-cost ratio and ranking.

No.	Project name	Sub-district	District	Province	B/C	Ranking
1	Ban Dong Weir	Khok Khwai	Ban Rai	Uthai Thani	0.63	18
2	Moo 8 Nuan Ma Ka Weir	Nam Rop	Lan Sak	Uthai Thani	1.12	5
3	Don Sawat Regulator	Hu Chang	Ban Rai	Uthai Thani	0.68	16
4	Ban Noi Regulator	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	0.45	20
5	Ban Phai Khiao 2 Regulator	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	0.84	13
6	Huib E Keng Regulator	Taluk Du	Thap Than	Uthai Thani	0.43	21
7	Beung Kum Sub Pumping Station	Ko Thepho	Mueang	Uthai Thani	0.25	24
8	Nong Jik Yao Culvert	Taluk Du	Thap Than	Uthai Thani	0.94	10
9	San Pho Pu Culvert	Taluk Du	Thap Than	Uthai Thani	0.67	17
10	Ban Klong Mai Lai Weir	Rabam	Lan Sak	Uthai Thani	1.22	3
11	Ban Don Sai Weir	Bo Yang	Sawang Arom	Uthai Thani	1.34	2
12	Wong Hin Weir	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	0.40	23
13	Phu Ta Lit Weir	Hu Chang	Ban Rai	Uthai Thani	0.96	9
14	Ban Mai Weir	Khok Khwai	Ban Rai	Uthai Thani	2.18	1
15	Wong luang Weir	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	1.01	7
16	Lan Ka Weir	Nong Bom Kluai	Ban Rai	Uthai Thani	0.22	25
17	Klong Lek Weir	Bo Yang	Sawang Arom	Uthai Thani	1.06	6
18	Huai Dua Weir	Thap Luang	Ban Rai	Uthai Thani	1.00	8
19	Huai Phu Ta Kian Weir	Nong Chok	Ban Rai	Uthai Thani	0.47	19
20	Koh Klang Culvert	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	0.71	14
21	Wong Toei Culvert	Taluk Du	Thap Than	Uthai Thani	1.16	4
22	Luang Pho Wicha Regulator	Pa O	Lan Sak	Uthai Thani	0.84	12
23	Ban Klong Cha Nee Bon Reservoir	Pa O	Lan Sak	Uthai Thani	0.42	22
24	Ban Wong Na San Weir	Pradu Yuen	Lan Sak	Uthai Thani	0.87	11
25	Ban Klong Lam Pang Weir	Phai Khiao	Sawang Arom	Uthai Thani	0.70	15

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ในการพัฒนานั้น จำเป็นในทุก ๆ พื้นที่ แต่ต้องพิจารณาตามขั้นตอนและความจำเป็น ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงจัดลำดับความสำคัญในภาพรวมทั้งจังหวัดอุทัยธานี

เอกสารอ้างอิง

กนกวรรณ จันทร์เจริญชัย. 2555. **การเตรียมและการประเมินโครงการ.** ภาควิชาเศรษฐศาสตร์, คณะเศรษฐศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กรมชลประทาน. 2560. **คำสั่งกรมชลประทาน เรื่อง กำหนดอายุการใช้งานสินทรัพย์ถาวร** (Online). http://kromchol.rid.go.th/fad/news/news_2562/news_2562/2878(2)-2562.pdf, ตุลาคม 2560.

ชูชีพ พิพัฒน์ศิถี. 2544. **เศรษฐศาสตร์การวิเคราะห์โครงการ.** ภาควิชาเศรษฐศาสตร์, คณะเศรษฐศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปกรณ์ ปรียากร. 2557. **การบริหารโครงการ: แนวคิดและแนวทางในการสร้างความสำเร็จ.** คณะรัฐประศาสนศาสตร์, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, สำนักพิมพ์เสมาธรรม, กรุงเทพฯ.

ประสิทธิ์ ตงยิ่งศิริ. 2544. **การวางแผนและการวิเคราะห์โครงการ.** บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพมหานคร.

เยาวเรศ ทับพันธุ์. 2543. **การประเมินโครงการตามแนวทางเศรษฐศาสตร์**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สำนักพัฒนาแหล่งน้ำขนาดใหญ่ กรมชลประทาน. 2560. **ความหมายประเภทของโครงการชลประทาน** (Online). http://lproject.rid.go.th/site/index.php/th/general-information/130-2015-06-22-02-00-53/209-2015-06-22-08-30-08, 20 กรกฎาคม 2561.

Akampurira, A. 2013. **Project Planning and Management.** An Aspect of Development Hamburge, Anchor Academic Publishing.

Brent, R.J. 2006. **Applied Cost–Benefit Analysis.** 2nd Ed. Edward Elgar, Cheltenham, UK.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM
Comparing the Performance of FLEXL, FLEX-Topo and Modified NAM Models

กัมพล อินสว่างวงศ์[*1] และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์[1]

Kamphon Insawangwong [*1] and Nutchanart Sriwongsitanon[1]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมินน้ำท่าด้วยแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า 3 แบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM ซึ่งสามารถสอบเทียบแบบจำลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชั่น คือ การสร้างความเข้ากันได้ระหว่างปริมาณการไหลในภาพรวม (I_{KGE}) ปริมาณการไหลต่ำ ๆ (I_{KGL}) และกราฟช่วงเวลาของปริมาณการไหล (I_{KGF}) ที่ได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการตรวจวัด ในการศึกษานี้ได้นำแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง มาประยุกต์ใช้ที่สถานีวัดน้ำท่าจำนวน 10 สถานี ในลุ่มน้ำยม โดยข้อมูลถูกแบ่งเป็น 2 ชุด คือประมาณ 70% เพื่อการสอบเทียบ (ค.ศ. 1985-2004) และ 30% เพื่อการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (ค.ศ.2005 -2013) ผลการศึกษาพบว่า FLEX-Topo ให้ค่า NSE ทั้งในช่วงการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองสูงกว่าทั้งแบบจำลอง FLEXL และ Modified NAM เพียงเล็กน้อยคือมากกว่าประมาณ 1 %และ 4 %ในช่วงการสอบเทียบและสูงกว่าประมาณ 1 %และ 5 %ในช่วงการตรวจพิสูจน์ อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง FLEX-Topo มีความสามารถในการประเมินปริมาณการไหลต่ำ ๆ ได้ดีกว่าแบบจำลอง FLEXL และ Modified NAM อย่างมีนัยสำคัญ โดยแบบจำลอง FLEX-Topo ให้ค่า I_{KGL} ในช่วงการตรวจพิสูจน์สูงกว่าแบบจำลอง FLEXL และ Modified NAM ประมาณ 11% และ 14% ตามลำดับ

ABSTRACT

This study aims to estimate runoff using three rainfall-runoff models comprising FLEXL, FLEX-Topo and Modified NAM. Control parameters of these models can be automatically calibrated using MOSCEM which is an optimization procedure based on three objective functions to set the relation between the calculated overall flows (I_{KGE}), low flows (I_{KGL}) and flow-duration curve (I_{KGF}) and the observed data. These models were utilized at 10 stations located in Yom River Basin. The input data were divided into 2 sets which are around 70% (1985-2004) for calibration and 30% (2005-2513) for validation. The results show that FLEX-Topo provided a little higher NSE values during the calibration and validation processes which are 1% and 4% higher than those of calculated using FLEXL and NAM during the calibration and 1% and 5% higher during validation process. However, FLEX-Topo shows significantly higher performance in

Key words: FLEXL, FLEX-Topo model, modified NAM model, MOSCEM, Yom River Basin

* Corresponding author; e-mail address: **Kampol.ins@gmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Water resources, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การประเมินกราฟน้ำท่าและกราฟน้ำท่วมสามารถกระทำได้ด้วยวิธีการที่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม วิธีการหนึ่งที่เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย คือ การใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ซึ่งเป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลด้านเข้าหลักคือข้อมูลฝน และข้อมูลด้านออกคือข้อมูลน้ำท่า ทั้งนี้ ข้อมูลด้านเข้ายังประกอบด้วยข้อมูลลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของลุ่มน้ำ เช่น ขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำ ความลาดชันของลำน้ำสายหลัก ความลาดชันของพื้นที่ลุ่มน้ำ ความยาวของลำน้ำสายหลักจากจุดไกลสุดบนสันปันน้ำจนถึงจุดออก สิ่งปกคลุมดิน (Land Use and Land Cover) ประเภทดิน (Soil Type) เป็นต้น โดยตัวอย่างของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่ใช้ข้อมูลเหล่านี้ เช่น แบบจำลอง SCS (Sharma and Surendra, 1992) แบบจำลอง Modified NAM (นุชนารถ, 2560) แบบจำลอง URBS (Mapiam and Sriwongsitanon, 2009) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ส่วนใหญ่ ไม่มีการนำลักษณะทางกายภาพที่มีความละเอียดในระดับสูงมาใช้เป็นข้อมูลด้านเข้า อาทิเช่น ข้อมูลความสูงต่ำของพื้นที่จากแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลการประเมินน้ำท่าเกิดความผิดพลาด ด้วยเหตุผลดังกล่าว Savenije (2010 (จึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลอง FLEX-Topo ขึ้นมา โดยมีสมมติฐานว่า ลักษณะสูงต่ำของสภาพภูมิประเทศมีอิทธิพลต่อกระบวนการทางอุทกวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM ในการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำยม โดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM ที่เป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชั่น คือ การสร้างความเข้ากันได้ระหว่างปริมาณการไหลในภาพรวม ปริมาณการไหลต่ำ ๆ และกราฟช่วงเวลาของปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการตรวจวัด โดยผลลัพธ์ของงานวิจัยจะสามารถบ่งบอกถึงข้อได้เปรียบและข้อเสียของแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองที่นำมาประยุกต์ใช้ต่อไป

พื้นที่ศึกษาและการรวบรวมข้อมูล

พื้นที่ศึกษา

ลุ่มน้ำยมตั้งอยู่ทางตอนเหนือของประเทศไทย โดยวางตัวตามแนวเหนือ-ใต้ ระหว่างเส้นรุ้งที่ 14°50´ เหนือ ถึงที่ 18°25´ เหนือ และระหว่างเส้นแวงที่ 99°16´ ตะวันออก ถึงที่ 100°40´ ตะวันออก ลุ่มน้ำยมมีขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งสิ้น 24,046 ตารางกิโลเมตร และมีความลาดชันลำน้ำประมาณ 1:700 โดยมีระดับความสูงระหว่าง 180 ถึง 360 เมตร (รทก.) ลุ่มน้ำยมประกอบด้วย 11 ลุ่มน้ำสาขา คือ แม่น้ำยมตอนบน แม่น้ำควร น้ำปี้ แม่น้ำงาว แม่น้ำยมตอนกลาง น้ำแม่คำมี น้ำแม่ต้า ห้วยแม่สิม น้ำแม่มอก น้ำแม่รำพัน และแม่น้ำยมตอนล่าง ลุ่มน้ำยมเป็นลุ่มน้ำที่ไม่มีอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ตั้งอยู่ รวมทั้งสภาพลำน้ำจะแคบลงในช่วงท้ายน้ำ บริเวณช่วงระหว่างจังหวัดสุโขทัยไปจนถึงจังหวัดพิจิตร ในขณะที่ปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดปัญหาน้ำท่วมเป็นประจำทุกปี

การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ประกอบด้วยข้อมูล 4 ประเภท คือ (1) ข้อมูลอัตราการไหลรายวันที่ตรวจวัดโดยกรมชลประทานในลุ่มน้ำยม ซึ่งคัดเลือกข้อมูลในระหว่างปี ค.ศ. 1985 ถึง ค.ศ. 2013 (29 ปี) ที่น่าเชื่อถือได้ โดยสถานีวัดน้ำท่าที่ถูกคัดเลือกมี

ทั้งสิ้น 10 สถานี ซึ่งประกอบด้วย สถานีวัดน้ำท่า Y.1C, Y.3A, Y.6, Y14, Y16, Y17, Y20, Y31, Y33 และ Y.37 (Figure 1) ทั้งนี้ ลักษณะเฉพาะของสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้แสดงดังใน (Table 1) ซึ่งประกอบด้วย ขนาดพื้นที่รับน้ำฝน ศักย์การคายระเหย ความลึกฝนรายปีเฉลี่ย ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ย และสัดส่วนระหว่างปริมาณน้ำท่า
(2) ข้อมูลความลึกฝนรายวันแบบกริด (Gauged Gridded Rainfall; GGR) ที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ศูนย์วิจัย Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management (SENSWAT) โดยนำข้อมูลฝนรายวันจากสถานีตรวจวัดทั่วประเทศจำนวน 1,779 สถานี มาตรวจสอบความถูกต้องด้วยกระบวนการโค้งทับทวี (Double mass curve) จากนั้นนำข้อมูลฝนที่ผ่านการตรวจสอบแล้วมาสร้างเป็นข้อมูลฝนเชิงกริดด้วยวิธีส่วนกลับของระยะทาง (Inverse Distance Weighted; IDW) สำหรับในการศึกษานี้ได้ประเมินความลึกฝนจากข้อมูลฝนกริด GGR ที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณาทั้ง 10 สถานี ดังกล่าวในลุ่มน้ำยม
(3) ข้อมูลศักย์การคายระเหยรายวัน (PET) ซึ่งรวบรวมจากข้อมูลศักย์การคายระเหยของพืชรายวันแบบกริดที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT โดยสร้างมาจากข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยารายวันจากสถานีตรวจอากาศ 103 สถานี ทั่วประเทศไทย โดยในการศึกษานี้ได้ประเมินค่า PET รายวันที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณาทั้ง 10 สถานี ในลุ่มน้ำยม และ (4) ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ ที่รวบรวมจากข้อมูลแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) จากนั้นนำไปผ่านแบบจำลอง HAND เพื่อแบ่งสัดส่วนพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็น พื้นที่ลาดชัด พื้นที่ลาดลุ่ม และพื้นที่ชุ่มน้ำ เพื่อประกอบการใช้งานแบบจำลอง FLEX-Topo

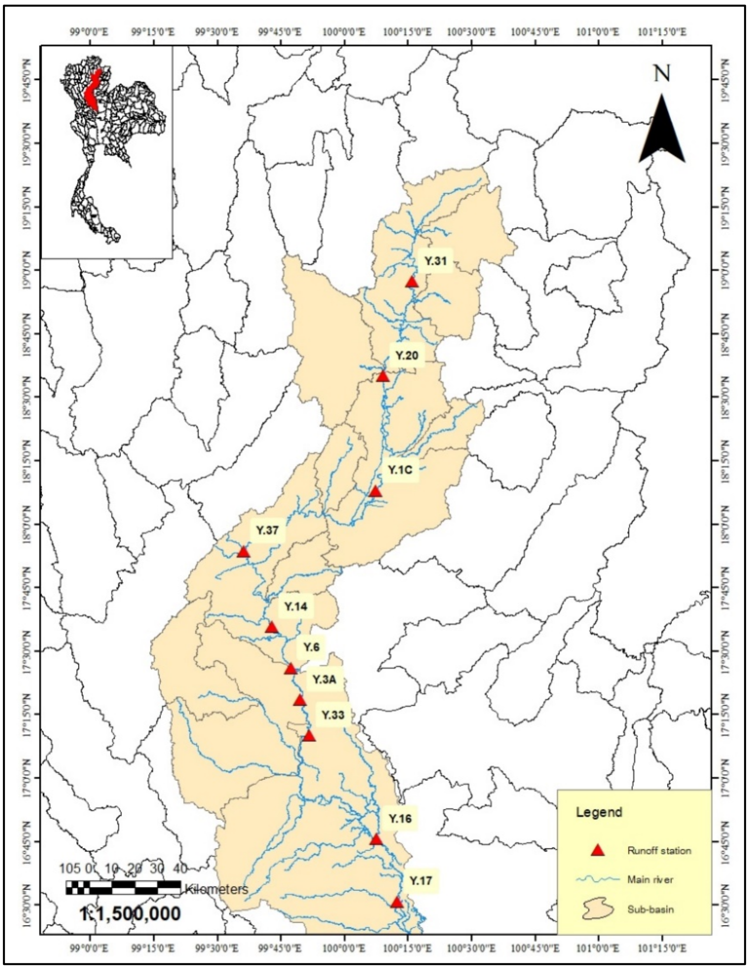


Figure 1 Locations of 10 selected Gauging stations in Yom River Basin.

Table 1 Catchment characteristics of 10 selected gauging stations in Yom River Basin.

Station code	Catchment area (Km^2)	PET (mm/yr)	Rainfall (mm/yr)	Runoff (MCM/yr)	Runoff/Rainfall (%)
Y.1C	7,298	1,242.6	1,281.0	2,357	25.21%
Y.3A	13,013	1,243.6	1,292.0	3,784	22.51%
Y.6	12,732	1,242.0	1,295.3	3,682	22.32%
Y.14	12,103	1,239.3	1,299.4	3,405	21.65%
Y.16	20,899	1,294.2	1,257.7	4,946	18.82%
Y.17	22,210	1,287.6	1,254.5	4,747	17.04%
Y.20	5,393	1,263.2	1,300.5	1,715	24.46%
Y.31	2,027	1,283.7	1,333.1	855	31.66%
Y.33	13,325	1,245.7	1,288.0	3,674	21.41%
Y.37	10,267	1,230.8	1,278.7	2,937	22.37%

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

แบบจำลอง FLEXL

แบบจำลอง FLEXL ซึ่งย่อจากคำว่า Flux Exchange จัดเป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ (Lumped Model) ที่ทำการประเมินน้ำท่าของลุ่มน้ำที่พิจารณา ณ สถานีที่ทำการตรวจวัดโดยการเฉลี่ยแบบทั่วพื้นที่ แบบจำลอง FLEXL ทำการแบ่งปริมาณการเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็น 5 ชั้นเก็บกัก ซึ่งประกอบด้วย (1) การเก็บกักในชั้นหิมะ (Snow Reservoir, S_w) (2) การเก็บกักตามใบไม้ใบหญ้าและพื้นผิว (Interception Reservoir, S_i) (3) การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil Reservoir, S_u) (4) การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Fast Response Reservoir, S_f) และ (5) การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (Slow Response Reservoir, S_s) (Gao *et al.*, 2014) โดยโครงสร้างของแบบจำลอง FLEXL แสดงดังใน (Figure 2 (a))

แบบจำลอง Modified NAM

Modified NAM ได้รับการปรับปรุงโดยนุชนารถ (2560) จากแบบจำลอง NAM ที่พัฒนาขึ้นโดย The Danish Hydraulic Institute (DHI) โดยการตัดกระบวนการย่อย ๆ ที่ไม่มีผลมากมายต่อการประเมินน้ำท่าในภาพรวมของแบบจำลอง NAM ออกไป ทั้งนี้ แบบจำลอง NAM มีแนวความคิดในการแบ่งปริมาณการเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็น 4 ส่วน คือ (1) การเก็บกักในชั้นหิมะ (Snow Storage))2) การเก็บกักในชั้นดินส่วนบน (Upper Zone Storage))3) การเก็บกักในชั้นดินส่วนล่าง (Lower Zone Storage) และ (4) การเก็บกักในชั้นน้ำใต้ดิน (Groundwater Storage) สำหรับโครงสร้างแบบจำลอง Modified NAM แสดงดังใน (Figure 2 (b))

แบบจำลอง FLEX-Topo

แบบจำลอง FLEX-Topo เป็นแบบจำลองที่ได้รับการปรับปรุงจากแบบจำลอง FLEXL โดยเพิ่มการจำลองแบบที่แตกต่างกันตามลักษณะภูมิประเภทซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ Hillslope, Terrace และ Wetland ดังนั้น จึงจัดเป็นแบบจำลองประเภทกึ่งดีสตริบิวท์ (Semi-distributed Model) อย่างไรก็ตาม

การจำลองแบบในแต่ละประเภทของสภาพภูมิประเทศมีลักษณะการดำเนินงานแบบลัมพ์ (Lumped Model) คือ การเฉลี่ยแบบทั่วพื้นที่ ทั้งนี้ การจำแนกความแตกต่างของลักษณะภูมิประเทศจะพิจารณาจากปัจจัย 2 ปัจจัย คือ (1) ความแตกต่างของระดับความสูงของพื้นที่กับระดับความสูงของตำแหน่งที่เป็นลำน้ำที่อยู่ใกล้สุด (Highest Above Nearest Drainage, HAND) (Rennó et al., 2008) และ (2) ความลาดชันของพื้นที่ (Slope) (Savenije, 2010) สำหรับโครงสร้างของแบบจำลอง FLEX-Topo แสดงดังใน (Figure 3)

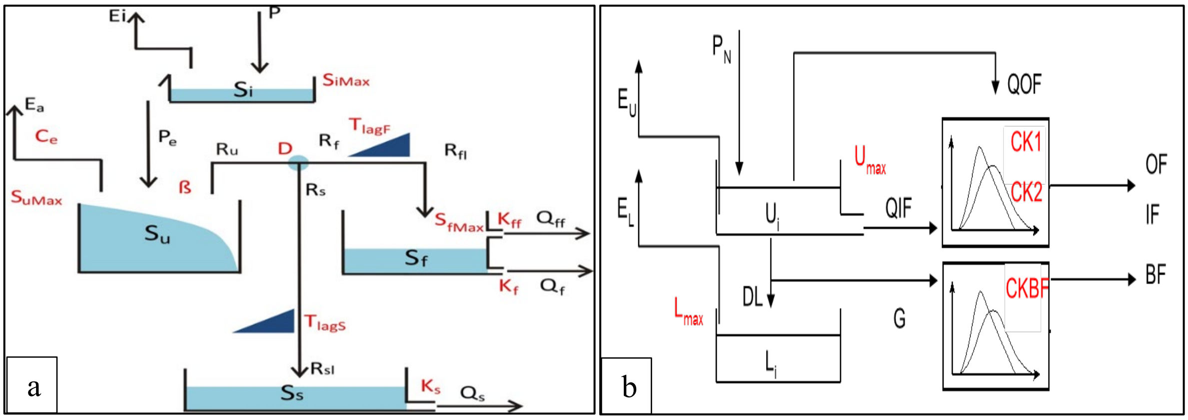


Figure 2 (a) Structure of FLEXL Model (Gao *et al*. 2014)

(b) Structure of Modified NAM Model

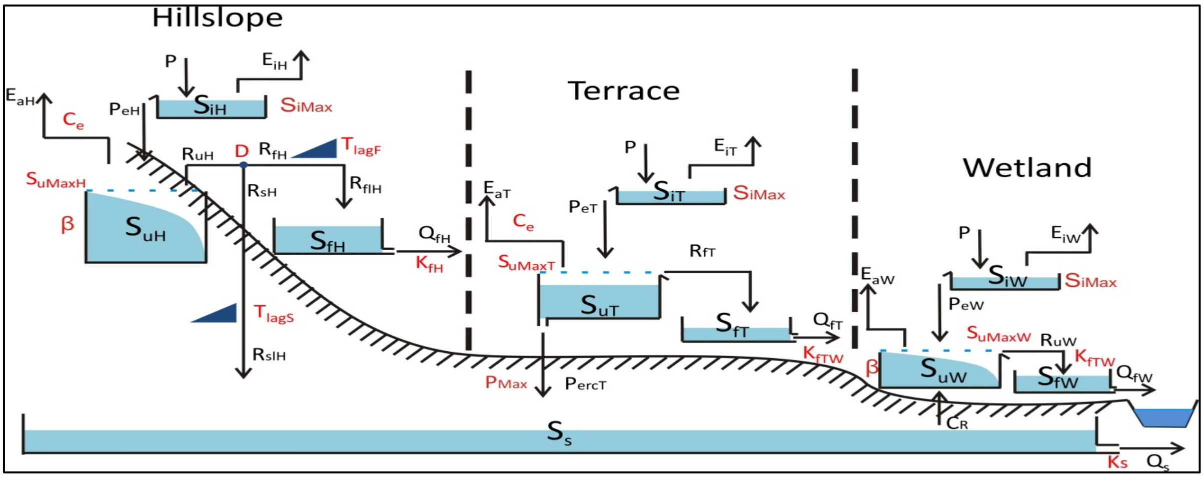


Figure 3 Structure of FLEX-Topo Model (Gao *et al*. 2014)

โปรแกรม MOSCEM

โปรแกรม MOSCEM ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Vrugt et al. (2003) เพื่อการหาค่าของชุดพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้านอุทกวิทยาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Function) ได้โดยอัตโนมัติ (Auto-Calibration) ทั้งนี้ MOSCEM จะทำการสุ่มประชากรชุดแรกให้มีการกระจายตัวทั่วทั้งมิติด้วยวิธี Latin Hyper Cube เพื่อนำไปคำนวณฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์สำหรับประชากรทุกตัวที่สุ่มมา จากนั้นจึงทำการจัดลำดับของประชากรแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยกระบวนการ Pareto Ranking (Goldberg, 1989) และนำไปผ่านกระบวนการลู่เข้าโดยใช้อัลกอริทึม Markov Chain Mote Carol (MCMC) เพื่อให้ได้ประชากรชุดถัดไป โดยชุดพารามิเตอร์ชุดสุดท้ายที่ได้จะเรียกว่า Pareto Front ซึ่งเป็นชุดพารามิเตอร์ที่มีค่าของฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์

ที่ไม่แพ้พารามิเตอร์ชุดอื่น ๆ ทั้งนี้ ฟังก์ชั่นแบบหลายวัตถุประสงค์ที่นำมาใช้ในแบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM ประกอบด้วย 3 ฟังก์ชั่น คือ การสร้างความเข้ากันได้ระหว่างปริมาณการไหลในภาพรวม (I_{KGE}) ปริมาณการไหลต่ำ ๆ (I_{KGL}) และกราฟช่วงเวลาของปริมาณการไหล (I_{KGF}) ที่ได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการตรวจวัด โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังในสมการที่ (1) โดยค่าที่ดีที่สุดที่แสดงการเข้ากันได้ระหว่างปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการตรวจวัดคือ 1

$$I = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\mu-1)^2} \qquad (1)$$

โดยที่ r คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear correlation coefficient) ของอัตราการไหลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง (Q_{model}) กับอัตราการไหลที่ได้จากการตรวจวัด ($Q_{observed}$)

α คือ อัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการไหลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการไหลที่ได้จากการตรวจวัด

μ คือ อัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของของอัตราการไหลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการไหลที่ได้จากการตรวจวัด

ทั้งนี้ ในการคำนวณหาค่า I_{KGL} ดำเนินการโดยการนำค่าปริมาณการไหลไป Take Log ก่อนนำไปคำนวณโดยใช้สมการที่ (1) เพื่อเป็นการเพิ่มความสำคัญให้กับปริมาณการไหลต่ำ ๆ

การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

การสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo และ Modified ได้ดำเนินการที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 10 สถานี เพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลน้ำฝน ข้อมูลน้ำท่า และข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิง ในช่วงเวลาประมาณ 70% ของข้อมูลทั้งหมด คือระหว่างปี ค.ศ.1985-2004 จากนั้นจึงนำชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่ได้จากกระบวนการสอบเทียบมาใช้ในการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลประมาณ 30% คือในระหว่างปี ค.ศ. 2005-2013 ทั้งนี้การสอบเทียบแบบจำลองได้ดำเนินการโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM โดยใช้ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชั่น อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ง่ายต่อการสรุปผลการศึกษาจึงได้นำตัวแปร Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ดังแสดงในสมการที่ (2) มาใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพโดยรวมของแต่ละแบบจำลอง โดยที่ O_{obsi} คือ ปริมาณน้ำท่ารายวันที่ได้จากการตรวจวัด O_{modi} คือ ปริมาณน้ำท่ารายวันที่ประเมินได้โดยแบบจำลอง และ Avg_{Obs} คือ ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายวันที่ได้จากการตรวจวัด

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{obsi}-Q_{modi})^2}{\sum_{i=1}^{N}(Q_{obsi}-Avg_{obs})^2}\right) \qquad (2)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo and Modified NAM แสดงดังใน Table 4 โดยในตารางดังกล่าวได้แสดงค่าทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่า I_{KGE} , I_{KGL} , I_{KGF} ซึ่งใช้เป็นฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ในกระบวนการหาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งได้แสดงค่า NSE เพื่อให้ง่ายในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละแบบจำลอง จากตารางดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ทุกแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าในภาพรวมใกล้เคียงกันทั้งในช่วงการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง โดยแบบจำลอง FLEX-Topo ให้ค่า NSE ในช่วงการสอบเทียบในภาพรวมของทั้ง 10 สถานี ที่ดีกว่าแบบจำลอง FLEXL และ Modified NAM เล็กน้อย คือประมาณ 1 % และ 4 % ตามลำดับ และดีกว่าในช่วงการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ประมาณ 1 % และ 5 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในส่วนของปริมาณการไหลต่ำ ๆ พบว่า แบบจำลอง FLEX-Topo ให้ผลการประเมินที่ดีกว่าแบบจำลอง FLEX และ Modified NAM ในช่วงของตรวจพิสูจน์อย่างเด่นชัด โดยมีค่า I_{KGL} ซึ่งแสดงความเข้ากันได้ของปริมาณการไหลต่ำ ๆ ที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-Topo โดยมีค่าสูงกว่าแบบจำลอง FLEXL และ Modified NAM ประมาณ 11 % และ 14 % ตามลำดับ ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างผลการเปรียบเทียบระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบโดยทั้ง 3 แบบจำลอง และที่ได้จากการตรวจวัดใน (Figure 4) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่สถานีวัดน้ำท่า Y.17 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบบจำลอง FLEX-Topo สามารถประเมินปริมาณการไหลต่ำ ๆ ได้ถูกต้องใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดมากกว่าแบบจำลอง FLEXL และ Modified NAM สำหรับผลที่สถานีอื่น ๆ ก็เป็นไปในทำนองเดียวกัน

Table 4 Results of model calibration and model validation at 10 gauging stations using FLEXL, FLEX-Topo and Modified NAM.

Model	Average and Range during calibration period				Average and Range during validation period			
	I_{KGE}	I_{KGL}	I_{KGF}	NSE	I_{KGE}	I_{KGL}	I_{KGF}	NSE
FLEXL	0.913 (.821-.958)	0.912 (.865-.948)	0.993 (.978-.998)	0.834 (.638-.929)	0.827 (.591-.948)	0.801 (.740-.837)	0.855 (.605-.986)	0.807 (.614-.889)
FLEX-TOPO	0.917 (.826-.934)	0.916 (.800-.937)	0.989 (.977-.997)	0.839 (.658-.935)	0.822 (.662-.932)	0.899 (.864-.933)	0.853 (.678-.973)	0.815 (.700-.914)
Modified NAM	0.904 (.805-.952)	0.902 (.861-.945)	0.983 (.959-.998)	0.809 (.617-.913)	0.808 (.617-.938)	0.767 (.618-.823)	0.840 (.628-.961)	0.776 (.535-.940)

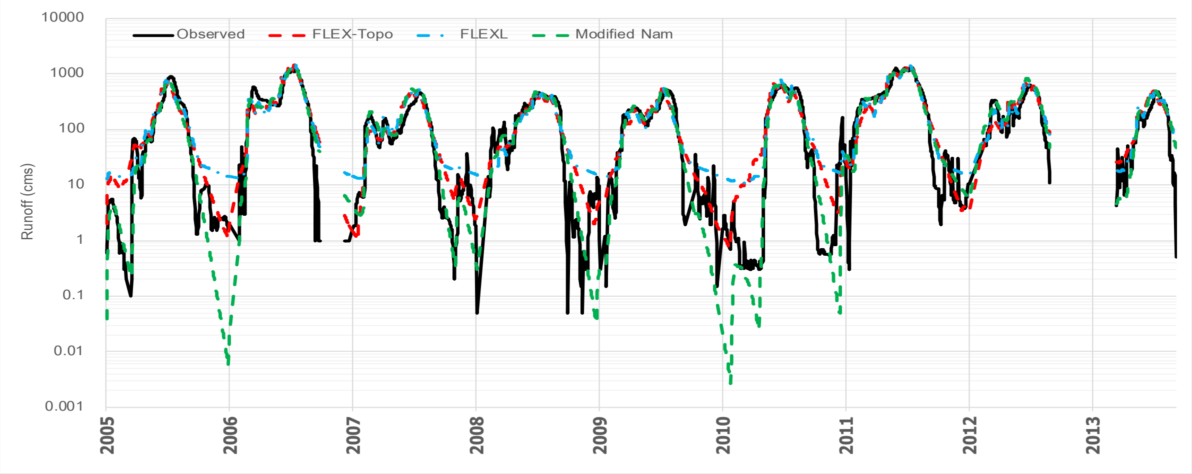


Figure 4 Simulated and observed hydrographs between 2005 and 2013 at Y.17 produced by FLEX-Topo, FLEXL and Modified NAM.

สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM ในการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำยม สรุปได้ว่าโปรแกรม MOSCEM มีประสิทธิภาพมากในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมโดยสามารถดำเนินงานได้แบบอัตโนมัติ สำหรับในส่วนของความสามารถในการประเมินน้ำท่าของทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่า ทั้ง 3 แบบจำลอง มีความสามารถใกล้เคียงกัน โดยที่แบบจำลอง FLEX-Topo ให้ผลการประเมินน้ำท่าในภาพรวมที่ถูกต้องมากกว่าแบบจำลอง FLEXL และ Modified NAM เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง FLEX-Topo มีความเด่นในด้านการให้ความถูกต้องของผลการประเมินปริมาณการไหลต่ำ ๆ มากกว่าแบบจำลอง FLEXL และ Modified NAM อย่างเห็นได้ชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยเพื่อการดำเนินงานของศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (SENSWAT) รวมทั้งขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2560. **อุทกวิทยาขั้นสูง** (ADVANCED HYDROLOGY). ภาควิชาวิศกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 49-88.

Gao, H., M. Hrachowitz, F. Fenicia., S. Gharari. and H. H. G. Savenije. 2014. Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China. **Hydrology and Earth System Sciences**. 18: 1895–1915.

Goldberg, D. E. 1989. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley-Longman. Reading, MA.

Mapiam,P.P. and N. Sriwongsitanon. 2009. Estimation of the URBS model parameters for flood estimation of ungauged catchments in the upper Ping river basin, Thailand. **ScienceAsia**. 35: 49-56.

Rennó, C.D., A.D. Nobre, L.A. Cuartas, J.V. Soares, M.G. Hodnett, J. Tomasella, and M. Waterloo. 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**. 112: 3469–3481.

Savenije, H.H.G. 2010. HESS Opinions "Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)". **Hydrology and Earth System Sciences**. 14: 2681– 2692.

Sharma, K.D. and S, Singh. 1992. Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model. **Hydrological sciences journal**. 37, pp. 39-52.

Vrugt, J.A., H.V. Gupta, L.A. Bastidas, W. Bouten and S. Sorooshian. 2003. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. **Water Resources Research**. Vol. 39, No. 8, 1214.

การวิเคราะห์แรงดันและคุณภาพน้ำประปาที่พักอาศัยตัวอย่างที่ใช้ระบบถังพักและเครื่องสูบน้ำ

Pressure and Water Quality Analysis in Residential Property Using Pump Tank System

<u>ชัยพร เจริญฉิม</u>[2*] ธีรภัทร เรืองสำเร็จ[1] ธรรศ สุรสราญวงศ์[1] ภานุพงศ์ ชารัตน์[1] อดิชัย พรพรหมินทร์[1]
และ วุฒินันท์ รักษาจิตร์[2]

<u>Chaiyaporn Charoenchim</u>[2*], Teerapat Ruangsumraj[1], Tas Surasaranwong[1], Panupong Charut[1]
Adichai Pornprommin[1] and Wuttinun Raksajit[2]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการใช้ระบบถังพักน้ำและเครื่องสูบน้ำสำหรับผู้ใช้น้ำประเภทที่อยู่อาศัย โดยได้ทำการตรวจวัดข้อมูล ณ ตำแหน่งก่อนเข้าถัง ภายในถัง และหลังถังของบ้านพักอาศัยหลังหนึ่งในเขตบางเขน กรุงเทพมหานครในช่วงเดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2562 ผลการตรวจวัด พบว่า แรงดันจากมาตรผู้ใช้น้ำก่อน/หลังถังพักน้ำมีค่าเฉลี่ย 6.26 และ 19.41 เมตร ตามลำดับ ความเข้มข้นคลอรีนก่อน/หลังถังมีค่าเฉลี่ย 0.35 และ 0.15 มก.ต่อลิตร ตามลำดับ อุณหภูมิผิวน้ำในถังบนดินมีหลังคาคลุมอยู่ระหว่าง 29.9-32.8°C การใช้ไฟฟ้าของเครื่องสูบน้ำทั้งเดือนมีค่า 30.24 กิโลวัตต์-ชม. คิดเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 82.09 บาท (15.5% ของค่าน้ำประปา) สุดท้ายผลการตรวจหาเชื้อแบคทีเรียพบว่า ไม่พบเชื้อก่อนเข้าถังและบริเวณผิวน้ำในถัง แต่พบเชื้อแบคทีเรียในน้ำก้นถังและหลังถัง อย่างไรก็ตาม เชื้อที่พบมีปริมาณน้อยกว่าเกณฑ์และเป็นเชื้อที่ไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์

ABSTRACT

The study aims to analyze the impact of pump tank systems for residential users by measuring data at various locations upstream, inside and downstream of a tank of a residential property in Bangkhen district, Bangkok, Thailand in October, 2019. The results show as follows. The average pressures upstream and downstream of the tank were 6.26 and 19.41 m, respectively. The average chlorine concentrations upstream and downstream of the tank were 0.35 and 0.15 mg/l, respectively. The temperature ranged between 29.9-32.8°c. The monthly electricity consumption by the pump was 30.24 Kw-hr costing 82.09 baht (15.5% of water cost). Finally, bacteria detection results show that bacteria was not detected at the upstream and surface of the tank, but it was detected at the bottom and downstream of the tank. However, the amount of detected bacteria was below the standard and not harmful species to humans.

Key words: Tank, Chlorine, Bacteria, MWA, Residential Customer

* Corresponding author; e-mail address: chaiyaporn.cha@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University , Bangkok 10900

คำนำ

ระบบจ่ายน้ำประปาในประเทศไทยมักประสบปัญหาแรงดันน้ำต่ำ ส่งผลให้ผู้ใช้น้ำต้องรับภาระในการติดตั้งระบบถังพักน้ำและเครื่องสูบน้ำ เพื่อสำรองน้ำและเพิ่มแรงดันน้ำให้เพียงพอ รวมทั้งน้ำประปาถูกส่งผ่านระบบท่อที่มีอายุการใช้งานที่นานหลายสิบปี ซึ่งอาจมีการชำรุดเสียหายและรั่วซึม จึงส่งผลน้ำประปามีแรงดันที่ไม่เพียงต่อความต้องการ โดยค่าเฉลี่ยของแรงดันน้ำในระบบท่อประปาทั่วทั้งเขตบริการของการประปานครหลวงอยู่ที่ประมาณ 8-10 เมตร (การประปานครหลวง, 2561) ทำให้ผู้ใช้น้ำจะต้องทำการติดตั้งเครื่องสูบน้ำและถังพักน้ำควบคู่ไปด้วย ดังนั้นน้ำที่นำออกมาใช้จะเป็นน้ำที่อยู่ก้นถังพักน้ำที่ถูกเก็บกักไว้เป็นเวลานาน ซึ่งปริมาณคลอรีนหลงเหลืออยู่อาจต่ำกว่ามาตรฐาน และทำให้หมดความสามารถในการกำจัดเชื้อโรคที่ปนเปื้อนมากับน้ำประปาสำหรับใช้ในการอุปโภคบริโภคได้ อีกทั้งยังเป็นการสร้างภาระค่าใช้จ่ายของผู้ใช้น้ำทั้งที่ไม่จำเป็นจากการติดตั้งและใช้ระบบถังพักน้ำและเครื่องสูบน้ำ จากปัญหาข้างต้น จึงนำไปสู่การศึกษาผลกระทบของการใช้ระบบเครื่องสูบน้ำและถังพักน้ำภายในที่อยู่อาศัยในมิติต่างๆ ได้แก่ แรงดัน ความเข้มข้นคลอรีน อุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้า และการตรวจหาเชื้อแบคทีเรีย ของบ้านพักอาศัยหลังหนึ่งในเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร เพื่อให้เข้าใจผลกระทบที่สอดคล้องกับสภาพความใช้งานจริงให้มากที่สุด

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการกำหนดแรงดันขั้นต่ำอ้างอิงจากเกณฑ์ค่าแรงดันในระบบจ่ายน้ำของสหรัฐอเมริกา กำหนดแรงดันขั้นต่ำไว้ที่ 14 เมตร หากแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์นี้ น้ำจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชน เพราะมีโอกาสสูงที่สารปนเปื้อนจะเข้าสู่ระบบจึงมีข้อแนะนำให้ต้มน้ำดื่มและล้างน้ำประปาที่ค้างในพื้นที่ และเมื่อเกิดระบบสูญเสียแรงดันอย่างสมบูรณ์(แรงดันต่ำกว่า 3.5 เมตร)เป็นระยะเวลายาวนานในพื้นที่ใด ๆ ของระบบจ่ายน้ำ โดยไม่รวมเหตุการณ์แรงดันต่ำหรือติดลบชั่วขณะจากแรงดันน้ำกระแทกเกิดจากการทำงานเป็นรอบของปั๊ม การทำงานของวาล์ว และเหตุการณ์ค้อนน้ำอื่น ๆ จำเป็นต้องออกข้อแนะนำให้ต้มน้ำดื่มไปยังผู้ใช้น้ำทั้งหมดในพื้นที่ได้รับผลกระทบ หลังจากที่แรงดันกลับมาและระบบคืนสู่สภาพปกติแล้ว ระบบท่อในพื้นที่ได้รับผลกระทบควรถูกปล่อยน้ำประปาเดิมทิ้งอย่างสมบูรณ์ และต้องเก็บตัวอย่างน้ำทดสอบแบคทีเรียโคลิฟอร์มเพื่อให้สามารถตัดสินใจว่าระบบจ่ายน้ำรักษาสภาพปราศจากการปนเปื้อนของแบคทีเรียโคลิฟอร์ม

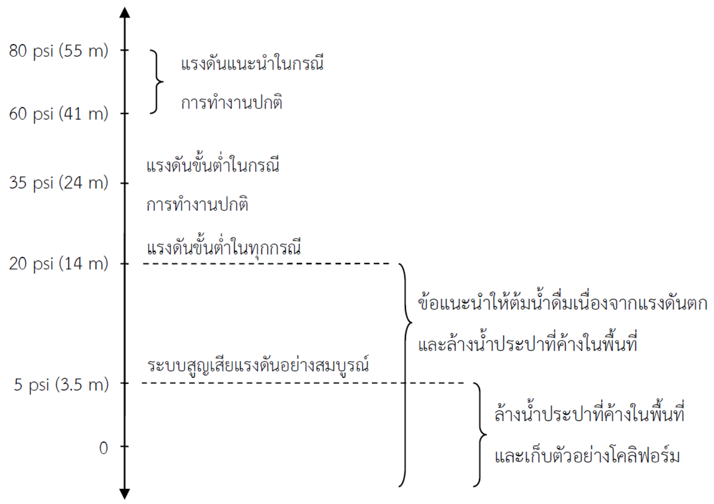


Figure 1 Recommended standards for water works.

พื้นที่ศึกษา

บ้านพักอาศัยในแขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร ห่างจากถนนพหลโยธินเป็นระยะทาง 200 เมตร อยู่ในพื้นที่การจ่ายน้ำประปาของการประปานครหลวง สาขาบางเขน ห่างจากสถานีสูบจ่ายน้ำบางเขน ประมาณ 6 กิโลเมตร จดทะเบียนผู้ใช้น้ำประเภท 1

ในการศึกษาครั้งนี้มีข้อจำกัดคือเป็นเพียงการศึกษาตัวอย่างที่พักอาศัยเพียงหลังเดียวเท่านั้น เพื่อเป็นการตรวจสอบผลกระทบจากการติดตั้งระบบถังพักและเครื่องสูบน้ำในเบื้องต้นและเป็นการสุ่มเลือกตัวอย่างเท่านั้น ผลที่ได้จึงไม่สามารถบอกถึงผลกระทบบ้านพักอาศัยทั้งหมดที่ติดตั้งระบบถังพักและเครื่องสูบน้ำได้

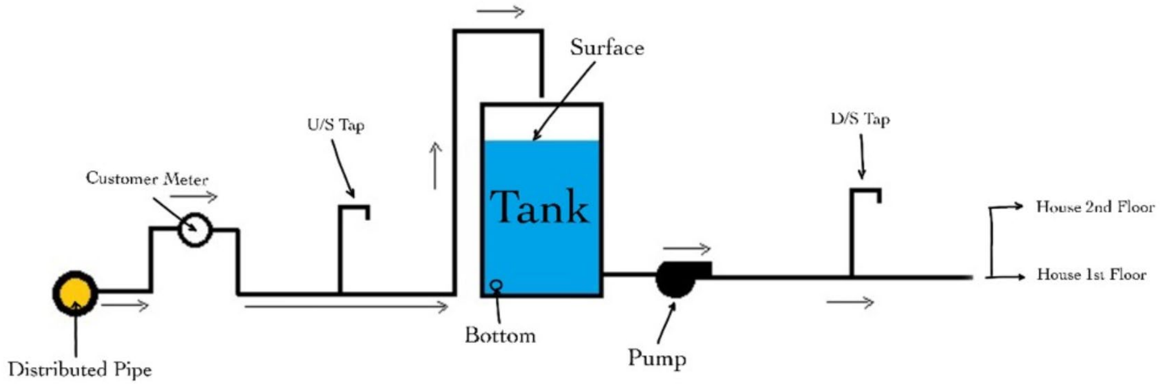


Figure 2 Study Area Schematic Diagram.

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ได้ตรวจวัดหลายตัวแปรเพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำและภาระด้านค่าใช้จ่าย ดังนี้ การวัดแรงดันน้ำได้ใช้เครื่องวัด ยี่ห้อ Primayer รุ่น Primelog P1 ซึ่งสามารถวัดแรงดันได้ระหว่าง 0 ถึง 10 บาร์และมีความละเอียดระดับ ±0.1% โดยวัดที่จุด U/S Tap และ D/S Tap (Figure 2) ระหว่างวันที่ 9 ตุลาคม 2562 เวลา 17.30 น. ถึงวันที่ 27 ตุลาคม 2562 เวลา 17.30 น. การวัดอุณหภูมิใช้เครื่องวัดยี่ห้อ Temp Data Logger รุ่น Temp Centre สามารถวัดอุณหภูมิที่ความแม่นยำ ±0.006 องศาเซลเซียส โดยวัดที่จุด Surface (Figure 2) ระหว่างวันที่ 9 ตุลาคม 2562 เวลา 17.30 น. ถึงวันที่ 27 ตุลาคม 2562 เวลา 17.30 น. การวัดค่าพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องสูบน้ำ ใช้เครื่องวัดยี่ห้อ CNZjSC โดยวัดที่จุด Pump (Figure 2) ระหว่างวันที่ 22 กันยายน 2562 ถึงวันที่ 4 พฤศจิกายน 2562

การวัดความเข้มข้นคลอรีนคงเหลืออิสระได้ใช้เครื่องวัด ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI701 ซึ่งสามารถวัดความเข้มข้นคลอรีนคงเหลืออิสระได้ระหว่าง 0.00 ถึง 2.50 ppm (mg/l) ความละเอียด 0.01 ppm (mg/l) และมีความแม่นยำระดับ ±0.03% โดยวัดที่จุด U/S Tap, D/S Tap ,House 1st Floor และ House 2nd Floor (Figure 2) ระหว่างวันที่ 10 ตุลาคม 2562 เวลา 18.00 ถึงวันที่ 14 ตุลาคม 2562 เวลา 18.00 น. การตรวจหาเชื้อแบคทีเรียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่จุด U/S Tap, Surface, Bottom และ D/S Tap (Figure 2) แล้วส่งไปวิจัยที่คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลักษณะถังเป็นถังพักน้ำสแตนเลส ยี่ห้อ jumbo ขนาด1100 L ตั้งไว้บนพื้นดินในร่มมีหลังคากันแดด และเครื่องสูบน้ำเป็นเครื่องสูบน้ำ ยี่ห้อ kikawa รุ่น KQ 40 ซึ่งเป็นเครื่องสูบน้ำประเภทเหวี่ยงหนีศูนย์

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์คลอรีน

จุดตรวจวัด U/S Tap มีความเข้มข้นคลอรีนที่มากกว่าทุกจุดตรวจวัด และความเข้มข้นที่ D/S Tap ก็มีปริมาณความเข้มข้นลดลง โดยความเข้มข้นคลอรีนที่ U/S Tap มีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 0.35 มิลลิกรัมต่อ จะเห็นได้ว่าปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่การประปากำหนดไว้ แต่ยังมีช่วงเวลาที่ความเข้มข้นคลอรีนต่ำกว่าเกณฑ์ เมื่อพิจารณาจากกราฟความเข้มข้นคลอรีนเฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ จะพบว่าความเข้มข้นคลอรีนจะมีแนวโน้มลดลงในช่วงเวลากลางคืน และจะต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่การประปานครหลวงกำหนดอยู่ 3 เวลาคือ 1.00 น. 2.00 น. และ 22.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำหรือมีน้ำค้างท่อเป็นเวลานานจึงทำให้อายุน้ำนั้นมากขึ้น คลอรีนในท่อเกิดการสลายตัวไปตามเวลา และพบว่าความเข้มข้นคลอรีนเฉลี่ยหลังจากจุด D/S Tap จะมีความเข้มข้นต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ (WHO, 2011) เป็นผลมาจากอายุน้ำจากการใช้ถังพักน้ำจึงสามารถกล่าวได้ว่าน้ำที่ผ่านการใช้ถังพักน้ำไม่สามารถดื่มได้เพราะอาจเกิดการปนเปื้อนจากการที่ปริมาณคลอรีนต่ำกว่ากำหนด

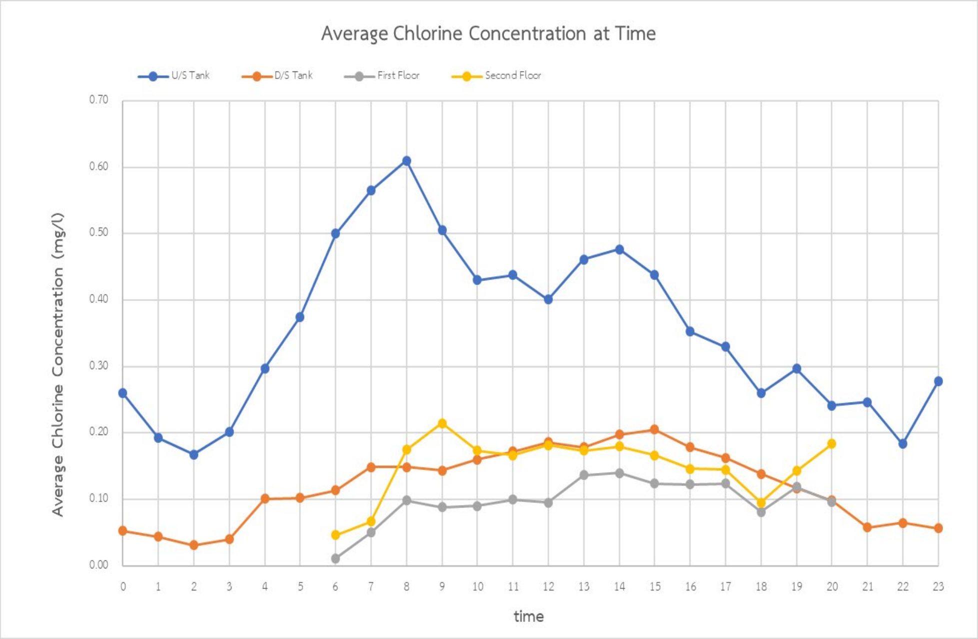


Figure 3 Average chlorine concentration.

ผลการวิเคราะห์ความดัน

พบว่าความดันน้ำก่อนเข้าสู่ถังพักน้ำมีค่าเฉลี่ยของความดันมีค่าประมาณ 6.261 เมตรซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแรงดันขั้นต่ำที่กำหนด แต่แรงดันเพียงขั้นต่ำนี้ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำในบ้านหลังนี้ กล่าวคือแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะส่งน้ำไปใช้งานยังชั้น 2 ของบ้านได้ (น้ำจะเบามากๆ) ทำให้ต้องทำการติดตั้งเครื่องสูบน้ำ เมื่อพิจารณาร่วมกับกราฟความดันเฉลี่ย ณ เวลาต่าง ๆ พบว่าจะมีช่วงเวลาที่แรงดันน้ำต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 2 ช่วงเวลา คือ 11.00 น.-16.00 น. และ 23.00 น.-4.00 น. โดยมีค่าแรงดันเฉลี่ยต่ำที่สุดคือเวลา 0.00 น. มีค่าแรงดันเฉลี่ยประมาณ 4.928 เมตร นอกจากนี้ยังพบว่าความดันน้ำหลังออกจากถังพักน้ำมีค่าเฉลี่ยของความดันมีค่าประมาณ 19.410 เมตรซึ่งเพียงพอต่อความต้องการแรงดันเพื่อส่งน้ำไปยังชั้น 2 ของบ้าน เมื่อนำกราฟทั้ง 2 คือกราฟความดันเฉลี่ยก่อนเครื่องสูบน้ำและความดันเฉลี่ยหลังเครื่องสูบน้ำมาเปรียบเทียบกัน

พบว่าการประปานครหลวงจะคงแรงดันให้สูงใน 2 ช่วงเวลาคือช่วงเช้าประมาณ 6.00 น. และ ประมาณ 21.00 น. เพื่อให้แรงดันเพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำ

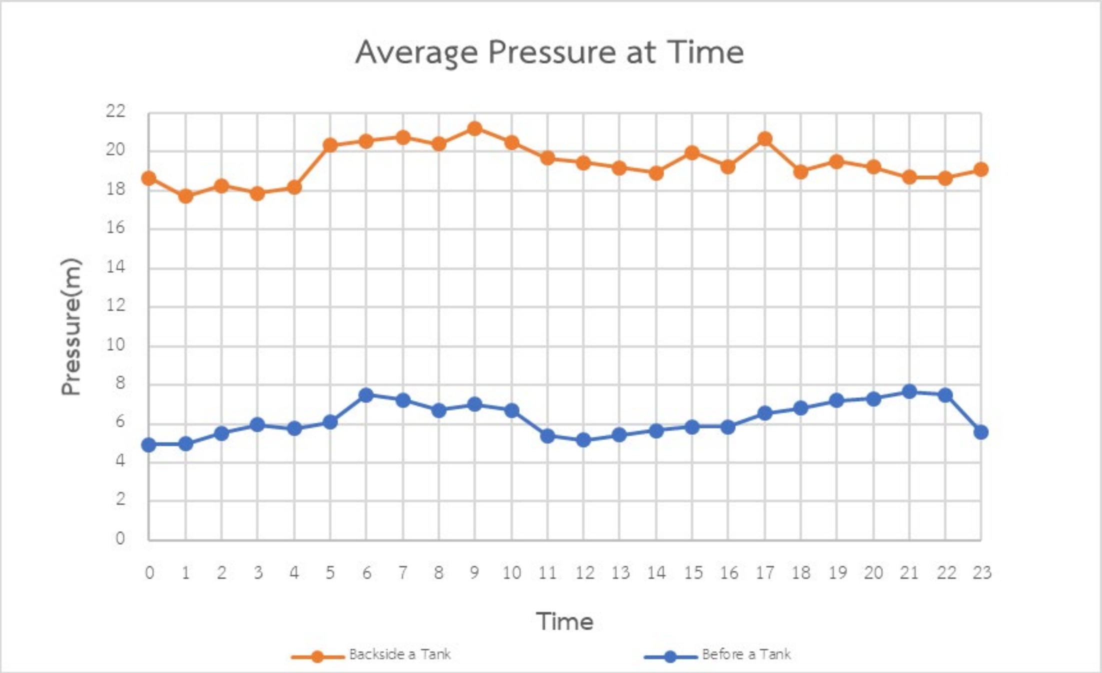


Figure 4 Compare pressure between U/S Tap and D/S Tap.

ผลการวิเคราะห์ภาระค่าใช้จ่ายไฟฟ้าจากการติดตั้งเครื่องสูบน้ำ

ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่ตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 0.89 กิโลวัตต์ชั่วโมง มีค่ามากที่สุดคือ 2.32 กิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งตรงกับวันที่มีการตรวจวัดค่าคลอรีนในบริเวณจุดตรวจวัดต่าง ๆ ทำให้มีการใช้เครื่องสูบน้ำมากกว่าปกติ และค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.07 กิโลวัตต์ชั่วโมง ในการคำนวณภาระค่าไฟฟ้าที่เกิดจากการใช้เครื่องสูบน้ำคำนวณเป็นตัวแทนของเดือนตุลาคม (1 ต.ค.-31 ต.ค.) เมื่อนำค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเครื่องสูบน้ำรายเดือนมาทำการเฉลี่ยพบว่า หากมีการติดตั้งเครื่องสูบน้ำขึ้น จะทำให้ผู้บริโภคต้องแบกรับภาระค่าไฟฟ้าเดือนละประมาณ 82.09 บาท โดยคำนวณจากสมการการแปลงค่าพลังงานไฟฟ้าเป็นค่าไฟฟ้า (การไฟฟ้านครหลวง, 2562)

พลังงานไฟฟ้า (ยูนิต หรือ KW-hour) = กำลังไฟฟ้า (W) X เวลา (ชั่วโมง) / 1,000 (1)

ค่าไฟฟ้า (บาท) = พลังงานไฟฟ้า (ยูนิต หรือ KW-hour) X ราคาต่อหน่วย (2)

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิในถังพักน้ำ

อุณหภูมิมีค่าเปลี่ยนแปลงและแตกต่างกันในแต่ละวันอันเนื่องมาจากอุณหภูมิของอากาศภายนอกที่เปลี่ยนไปในแต่ละ เมื่อนำอุณหภูมิทั้งหมดที่ตรวจวัดมาทำการเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลาจะได้กราฟอุณหภูมิเฉลี่ย ณ ช่วงเวลาต่างๆ ใน 24 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิมีแนวโน้มที่จะเริ่มเพิ่มขึ้นที่เวลา 8.00 น.และเพิ่มขึ้นสูงสุด ณ เวลา 18.00 น. อุณหภูมิเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 31.86 องศาเซลเซียส แล้วจะเริ่มลดลงจนกระทั่งลดต่ำสุดที่เวลา 8.00 น. อุณหภูมิเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 31.07 องศาเซลเซียส

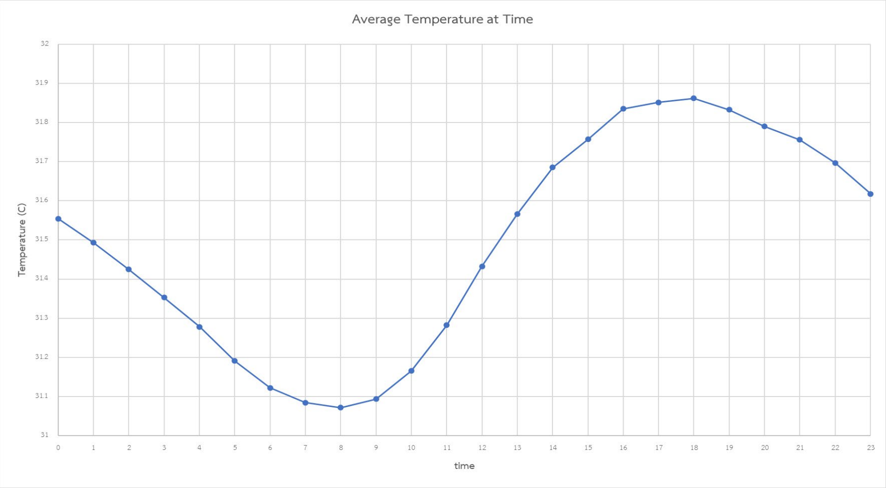
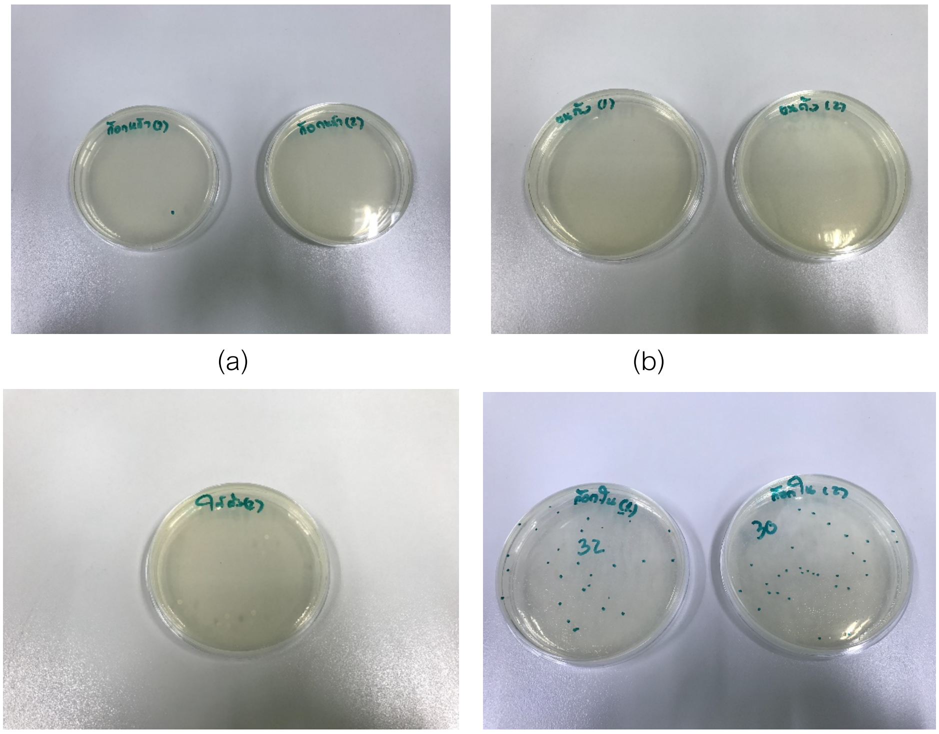


Figure 5 Average Temperature.

ผลการวิเคราะห์การทดสอบตรวจหาเชื้อโรค

ในการทดสอบการตรวจหาเชื้อโรคในน้ำประปาได้ทำการเก็บตัวอย่างมาทั้งหมด 4 ตัวอย่างจาก 4 จุดตรวจวัด คือ U/S Tap, Surface, Bottom และ D/S Tap (Figure 2) พบว่าจุดตรวจวัด U/S Tap และ Surface ไม่พบเชื้อแบคทีเรียทำให้สรุปได้ว่าน้ำที่ได้รับจากการประปานครหลวงมาถึงบ้านหลังนี้มีความสะอาด แต่เมื่อตรวจวัดบริเวณ Bottom และ D/S Tap พบว่าเกิดเชื้อแบคทีเรียเกิดขึ้นที่บริเวณ Bottom และ D/S Tap โดยพบที่บริเวณ D/S Tap มากกว่า Bottom เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของคลอรีนแล้วก็สามารถระบุได้ว่า เชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้นมีส่วนมาจากความเข้มข้นของคลอรีนที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตาม เชื้อที่ตรวจพบมีปริมาณน้อยกว่าเกณฑ์ที่ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์และเป็นเชื้อชนิดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์



(a) (b)

(c) (d)

Figure 6 Bacteria detection results at (a) U/S Tap ,(b) Surface ,(c) Bottom and (d) D/S Tap

สรุปผลและเสนอแนะ

จากผลการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการใช้ระบบถังพักน้ำและเครื่องสูบน้ำสำหรับผู้ใช้น้ำประเภทที่อยู่อาศัยพบว่า แรงดันจากมาตรผู้ใช้น้ำก่อนเข้าถังพักมีค่าแรงดันเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแรงดันขั้นต่ำที่กำหนด แต่ยังมีบางช่วงเวลาที่แรงดันน้ำต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานแรงดันขั้นต่ำ ส่งผลให้ผู้ใช้น้ำจำเป็นต้องติดตั้งถังพักน้ำและเครื่องสูบน้ำ ผลการวิเคราะห์หาความเข้มข้นคลอรีนก่อนเข้าถังพักน้ำมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่การประปากำหนดไว้ ทั้งนี้ความเข้มข้นคลอรีนในน้ำประปาที่ออกจากถังพักมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ ส่งผลให้พบเชื้อแบคทีเรียในน้ำบริเวณก้นถังพักและน้ำที่ออกจากถังพัก ในขณะที่น้ำก่อนเข้าถังพักและน้ำบริเวณผิวบนถังพักไม่มีการพบเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้นมีส่วนมาจากความเข้มข้นของคลอรีนที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้พบว่าการใช้ไฟฟ้ามีค่า 30.24 กิโลวัตต์-ชม. พบว่าค่าไฟฟ้าจากการใช้เครื่องสูบน้ำคิดเป็น 15.5% ของค่าน้ำประปา จากผลการศึกษาข้างต้นพบว่าการติดตั้งระบบถังพักน้ำและเครื่องสูบน้ำส่งผลเสียด้านคุณภาพน้ำและเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายให้กับผู้ใช้น้ำ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เป็นการสุ่มตัวอย่างบ้านพักเพียงบ้านพักเดียวเท่านั้นและตรวจวัดเพียงแค่ช่วงเวลาเดียว จึงทำให้ไม่เห็นผลลัพธ์ทั้งหมดของการบริหารจัดการของการประปานครหลวงได้ได้อย่างชัดเจน หากต้องการให้เกิดความครอบคลุมควรจะทำการทดลองในบ้านหลาย ๆ หลัง ณ บริเวณนั้น และเก็บข้อมูลหลาย ๆ ช่วงเวลา หากต้องการจะเพิ่มคุณภาพน้ำในครัวเรือนที่ใช้ระบบถังพักน้ำและเครื่องสูบน้ำจะต้องติดตั้งเครื่องจ่ายคลอรีนเพิ่ม เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของคลอรีนในระบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน

เอกสารอ้างอิง

การประปานครหลวง. 2561. **รายงานประจำปี 2561 การประปานครหลวง** ,ม.ป.ท.

การไฟฟ้านครหลวง. 2562. **การคำนวณค่าไฟฟ้า** (Online). https://www.mea.or.th/aboutelectric/116/280/form/11, 14 พฤศจิกายน 2562.

อดิชัย พรพรหมินทร์. 2561. **ชลศาสตร์ระบบจ่ายน้ำประปา Hydraulics of Potable Water Distribution Systems.** ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

IWA .2018. **International Statistics for Water Services 2018.** IWA Statistic and Economics, n.p.

U.S. Department of Energy. 2017. **Water and Wastewater Annual Price Escalation Rates for Selected Cities across the United States.** U.S. Department of Energy. Washington, D.C.,U.S.A.

World Health Organization. 2003. **Chlorine in Drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.** World Health Organization, Geneva, Switzerland.

World Health Organization. 2011. **Measuring chlorine levels in water supplies.** World Health Organization, Geneva, Switzerland.

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการแยกน้ำโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

Hydrogen Production by Photocatalytic Water Splitting over Ag-TiO2 powder

ชนาธิป แก้วรุ่งฟ้า[1*] กฤษณะ กอบวิทยา[1] และ สัญญา สิริวิทยาปกรณ์[1]

Chanathip Kaewroongfha[1*], Krisana Kobwittaya[1] and Sanya Sirivithayapakorn[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (Ag-TiO_2) ในการแยกน้ำโดยใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลติกสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจน จากการศึกษา พบว่า ชุดระบบปฏิกรณ์ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสง UV และมีการใช้ผง TiO_2, 0.1 mol% Ag-TiO_2, 0.5 mol% Ag-TiO_2, 1 mol% Ag-TiO_2, 3 mol% Ag-TiO_2 และ 5 mol% Ag-TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้เท่ากับ ND (Not Detected), 0.027, 0.017, 0.053, 0.027 และ 0.013 µmol ตามลำดับ และชุดระบบปฏิกรณ์ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสง Vis สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้เท่ากับ ND, 0.014, 0.029, 0.043, 0.060 และ 0.067 µmol ตามลำดับ ดังนั้น ภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมงปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้มากที่สุด คือ 0.053 และ 0.067 µmol เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสง UV ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1 mol% Ag-TiO_2 และแสง Vis ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 5 mol% Ag-TiO_2 ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนของระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดแสง UV และ Vis มีความแตกต่างกัน โดยหลักแล้ว ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ช่องว่างแถบระหว่างพลังงาน (energy gap)

ABSTRACT

The study on the use of silver-doped titanium dioxide (Ag-TiO_2) for hydrogen production by photocatalytic water splitting The results showed that, the reactor equipped with UV light bulb and containing different TiO_2, 0.1 mol% Ag-TiO_2, 0.5 mol% Ag-TiO_2, 1 mol% Ag-TiO_2, 3 mol% Ag-TiO_2 and 5 mol% Ag-TiO_2 powder photocatalysts produced ND (Not Detected), 0.027, 0.017, 0.053, 0.027 and 0.013 µmol of hydrogen gas, respectively. For the reactor equipped with Vis light bulb, ND, 0.014, 0.029, 0.043, 0.060 and 0.067 µmol of hydrogen gas were generated respectively. Hence, for 2-hour reaction time, highest amount of hydrogen gas produced is 0.053 and 0.067 µmol for the use of UV light with 1 mol% Ag-TiO_2 photocatalyst and Vis light with 5 mol% Ag-TiO_2 photocatalyst, respectively. Additionally, the results demonstrate that hydrogen production efficiency of UV and Vis light systems are different, mostly depending on the optical properties of such photocatalysts, especially energy gap.

Key words: photocatalytic, water splitting, hydrogen, Ag-TiO_2

* Corresponding author; e-mail address: **Chanathip.krf@gmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งพลังงานที่มนุษย์นำมาใช้ในชีวิตประจำวันและขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศในปัจจุบัน แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ พลังงานสิ้นเปลือง (Nonrenewable energy) และพลังงานทดแทน (Renewable energy) โดยพลังงานสิ้นเปลือง คือ พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ซึ่งรวมถึงถ่านหิน น้ำมันดิบ น้ำมันเชื้อเพลิง และแก๊สธรรมชาติ ส่วนพลังงานทดแทน คือ พลังงานหมุนเวียนที่ได้จากกากอ้อย ชีวมวล น้ำ แสงอาทิตย์ ลม และคลื่น เป็นต้น

พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพลังงานสิ้นเปลือง ซึ่งมีแนวโน้มว่าในอนาคตอาจเกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงานได้ จึงมีการผลักดัน ส่งเสริม และสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มมากขึ้น ไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงที่ถูกคาดการณ์ว่าจะเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอนาคต เนื่องจากเชื้อเพลิงไฮโดรเจนนั้นสามารถผลิตได้จากการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแสงอาทิตย์ จึงทำให้วัฏจักรของพลังงานและพลังงานที่ได้มีความสะอาด แหล่งที่มาของพลังงานทดแทนได้จาก 2 แหล่งพลังงานหลัก คือ พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม เมื่อพิจารณาแหล่งพลังงานทั้งสองนี้ พลังงานแสงอาทิตย์มีแนวโน้มเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเป็นพลังงานทดแทนได้มากกว่าการใช้พลังงานลม อย่างไรก็ตามในปัจจุบัน มีการผลิตไฮโดรเจนในเชิงพาณิชย์อยู่ 2 รูปแบบ แบบที่ 1 ผลิตไฮโดรเจนโดยใช้กระแสไฟฟ้า คิดเป็น 5% และแบบที่ 2 ผลิตไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงอื่นๆ คิดเป็น 95% ในอดีตการผลิตไฮโดรเจนเป็นพลังงานทดแทนไม่เป็นที่นิยมเพราะมีค่าใช้จ่ายสูง ตัวอย่างเช่น การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolysis) แต่ในปัจจุบันการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นวิธีการผลิตไฮโดรเจนจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Ni *et al.*, 2004)

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการแยกน้ำ (Hydrogen Production by Photocatalytic Water Splitting) เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานแสงหรือโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) และพลังงานวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) หรือเรียกว่าช่องว่างแถบระหว่างพลังงาน (energy gap) จะทำให้อิเล็กตรอนในวาเลนซ์แบนด์ถูกกระตุ้นและเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ เกิดเป็นคอนดักชันอิเล็กตรอน (e_{CB}^-) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยโฟตอน (Photogenerated electron) ในขณะที่วาเลนซ์แบนด์จะเกิดเป็นหลุมประจุบวกหรือวาเลนซ์โฮล (h_{VB}^+) ในขณะเดียวกันน้ำจะให้อิเล็กตรอนแก่วาเลนซ์โฮล ซึ่งได้ก๊าซออกซิเจนและโปรตอน (H^+) จากนั้นโปรตอนที่เกิดขึ้นจะไปรับคอนดักชันอิเล็กตรอน กลายเป็นไฮโดรเจนโมเลกุลตามสมการดังต่อไปนี้ (Chiarello *et al.*, 2010)

$$TiO_2 + h\nu \rightarrow e_{CB}^- + h_{VB}^+ \quad (1)$$

$$H_2O + 2h_{VB}^+ \rightarrow 1/2\ O_2 + 2H^+ \quad (2)$$

$$2H^+ + 2e_{CB}^- \rightarrow H_2 \quad (3)$$

รวมสมการกระบวนการแยกน้ำทั้งหมด

$$H_2O + 2h\nu \rightarrow H_2 + 1/2\ O_2 \quad (4)$$

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการโฟโตแคตาไลติกสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากการแยกน้ำ โดยใช้ผง Ag-TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ภายใต้สภาวะที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันสอง

ชนิด (แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) และแสงวิซิเบิล (Visible, Vis)) งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันและตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่มีการเจือ Ag ในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อปรับปรุงและพัฒนาระบบการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติก รวมถึงประสิทธิภาพของผง Ag-TiO_2 ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน และการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ในอนาคตได้อีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO_2

เตรียมตัวเร่งปฏิริยา x mol% Ag-TiO_2 (x=0, 0.1, 0.5, 1, 3 และ 5) ด้วยวิธี solid-state reaction โดยสารตั้งต้นคือ TiO_2 (KemAus; 99%), $AgNO_3$ (Poch; 99.9%) และ Absolute Ethanol (QrëC; 99.9%) ขั้นตอนการเตรียมเป็นดังนี้(ดัดแปลงKobwittaya *et al.*, 2017)

ชั่งผง TiO_2 ตามปริมาณที่ต้องการ จากนั้นชั่งผง $AgNO_3$ โดยคำนวณปริมาณที่ต้องการเทียบกับปริมาณ TiO_2 ที่ใช้ ผสมสารทั้งสองชนิดด้วยโกร่งบดสารโดยใช้ Absolute Ethanol เป็นตัวทำละลาย จากนั้นกวนผสมสาร 40 นาที เมื่อกวนผสมเสร็จแล้วนำโกร่งบดสารที่มีสารเนื้อผสมนี้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 60 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator ต่อมานำผงที่ได้จากการอบใส่ Crucible แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 60 นาที (อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง) เมื่อเผาเสร็จ นำผงที่ได้บดด้วยโกร่งบดสารจะได้ผงตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO_2 ตามที่ต้องการ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่ไม่มีการเจือเงินใช้วิธีการเตรียมแบบเดียวกัน แต่ไม่มีการเติม $AgNO_3$

การทดลองในชุดระบบปฏิกรณ์แสง

การทดลองถูกจัดให้อยู่ในชุดระบบปฏิกรณ์แสง (Photocatalytic reactor) ขนาด 1 ลิตร โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ คือ หลอดไฟอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet light bulb, UV) และหลอดไฟวิซิเบิล (Visible light bulb, Vis) แหล่งกำเนิดแสงนี้ติดตั้งภายในถังปฏิกรณ์ที่บริเวณกึ่งกลางของถังปฏิกรณ์ตามแนวตั้งของถัง มีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ด้วยการใช้ระบบหล่อเย็น

ทดลองโดยการชั่งน้ำหนัก TiO_2 1 กรัม จากนั้นใส่ผง TiO_2 1 กรัมนี้ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร และเติมสารละลายเมทานอล (Honeywell; 99.8%) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงไป แล้วกวนผสมให้เข้ากันในชุดระบบปฏิกรณ์แสง (ยังไม่เปิดหลอดไฟ) จากนั้นทำการไล่อากาศออกจากถังปฏิกรณ์โดยการเติมแก๊สไนโตรเจน (99.999%) เข้าสู่ระบบ 40 นาทีก่อนเริ่มทำการทดลอง (ที่บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์จะมี 2 วาล์ว โดย 1 วาล์วสำหรับไล่อากาศ และอีก 1 วาล์วสำหรับติดตั้งถุงเก็บแก๊ส)

เริ่มการทดลองด้วยการตั้งค่าเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer) ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที และตั้งค่าเครื่องทำความเย็นแบบน้ำหมุนวน (Cooling Bath Circulator) ที่อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในชุดระบบปฏิกรณ์แสงให้อุณหภูมิคงที่ที่ 29±1 องศาเซลเซียส ทำการทดลองเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาตามที่กำหนด นำถุงเก็บแก๊สไปวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น

สำหรับชุดการทดลองอื่นๆ ทำการทดลองตามรูปแบบเดียวกันกับวิธีการทดลองข้างต้น แต่เปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาจาก TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ที่ได้ทำการเตรียมไว้ (0.1 mol% Ag-TiO_2, 0.5 mol% Ag-TiO_2, 1 mol% Ag-TiO_2, 3 mol% Ag-TiO_2 and 5 mol% Ag-TiO_2)

การวิเคราะห์ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน

ทำการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC-TCD, Shimadzu, GC-2014)

ปริมาตรของตัวอย่างแก๊สที่ใช้ฉีดเท่ากับ 1ml. ในการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี(Gas chromatography, GC-TCD, Shimadzu, GC-2014)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากการแยกน้ำโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลติก ด้วยชุดระบบปฏิกรณ์แสงที่ใช้แหล่งกำเนิดแตกต่างกัน 2 ชนิด และผง TiO_2 ที่ไม่มีการเจือเงินและมีการเจือเงินที่ปริมาณแตกต่างกันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าชุดระบบปฏิกรณ์แสงที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet light bulb, UV) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้แสดงใน Figure 1 เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่ไม่มีการเจือเงินอาจมีปริมาณน้อยมาก ซึ่งเครื่องตรวจวัดไม่สามารถตรวจพบได้ (Not Detected, ND) หรือไม่สามารถผลิตได้เลย ต่อมาเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่มีการเจือเงินที่ปริมาณ 0.1, 0.5, 1, 3, และ 5 mol% พบว่าปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นนั้น เท่ากับ 0.027, 0.017, 0.053, 0.027 และ 0.013 μmol ตามลำดับ

ในอีกชุดการทดลองหนึ่ง ดังแสดงใน Figure 2 เมื่อใช้หลอดไฟวิซิเบิล (Visible light bulb, Vis) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่ไม่มีการเจือเงิน ยังคงให้ผลเช่นเดิม แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่มีการเจือเงินที่ปริมาณ 0.1, 0.5, 1, 3, และ 5 mol% พบว่า ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้นั้น มีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ดังนี้ 0.014, 0.029, 0.043, 0.060 และ 0.067 μmol ตามลำดับ

จากผลการศึกษานี้ ชุดระบบปฏิกรณ์แสงที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟ UV สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้มากที่สุด เท่ากับ 0.053 μmol ภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 mol% Ag-TiO_2 และในชุดระบบปฏิกรณ์แสงที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟ Vis พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 mol% Ag-TiO_2 ค่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้มากที่สุดสำหรับชุดการทดลองนี้ เท่ากับ 0.067 μmol นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน พบว่า โดยภาพรวมนั้น แสง UV มีความเหมาะสมต่อระบบที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 mol% Ag-TiO_2, 0.5 mol% Ag-TiO_2 และ 1 mol% Ag-TiO_2 และแสง Vis มีความเหมาะสมต่อระบบที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 mol% Ag-TiO_2 และ 5 mol% Ag-TiO_2 ลักษณะดังกล่าวนี้ สามารถอธิบายได้ด้วยการพิจารณาช่องว่างแถบระหว่างพลังงาน (energy gap) ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 mol% Ag-TiO_2, 0.5 mol% Ag-TiO_2 และ 1 mol% Ag-TiO_2 มีช่วง energy gap ที่ใกล้เคียงกับช่วงความยาวคลื่นของแสง UV มากกว่าแสง Vis (Ni *et al.*, 2007 และ Sun *et al.*, 2012) ในทางกลับกัน ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 mol% Ag-TiO_2 และ 5 mol% Ag-TiO_2 มีช่วง energy gap ที่ใกล้เคียงกับช่วงความยาวคลื่นของแสง Vis มากกว่าแสง UV (Navarro *et al.*, 2009)

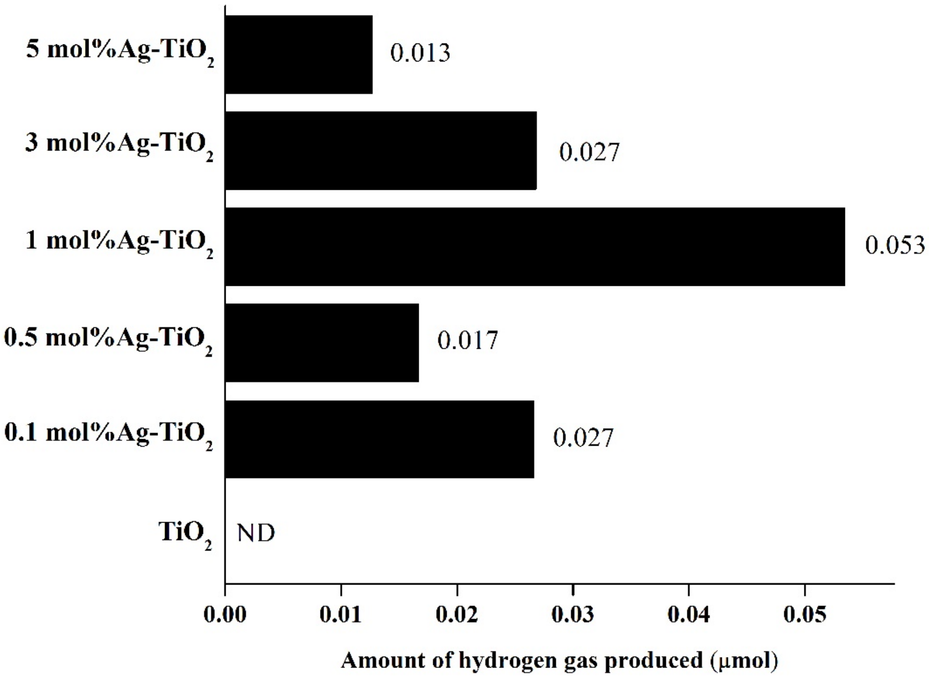


Figure 1 Amount of hydrogen gas produced (μmol) by photocatalytic water splitting over different photocatalysts. Light source: 1 UV light bulb. ND = Not Detected.

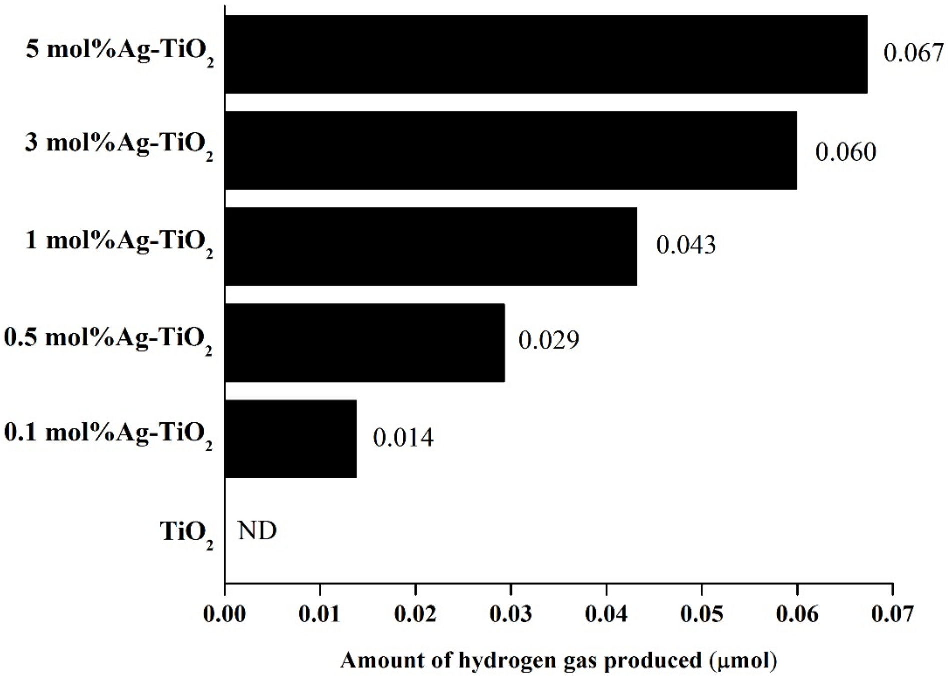


Figure 2 Amount of hydrogen gas produced (μmol) by photocatalytic water splitting over different photocatalysts. Light source: 1 Vis light bulb. ND=Not Detected.

สรุป

การศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (Ag-TiO_2) ในการแยกน้ำโดยใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลติกสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) และแสงวิซิเบิล (Visible, Vis) เป็นแหล่งพลังงาน พบว่า ผง 0.1 mol% Ag-TiO_2, 0.5 mol% Ag-TiO_2, 1 mol% Ag-TiO_2, 3 mol% Ag-TiO_2 และ 5 mol% Ag-TiO_2 มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการดังกล่าวภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงทั้งสองชนิดในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้มากที่สุด ภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ มีค่าเท่ากับ 0.053 และ 0.067 μmol เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสง UV ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1 mol% Ag-TiO_2 และแสง Vis ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 5 mol% Ag-TiO_2 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการประเมินค่าใช้จ่ายและความคุ้มค่าในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการแยกน้ำโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงินสามารถสรุปได้เบื้องต้นดังต่อไปนี้

1. การเลือกใช้วัสดุที่ทำเป็นชุดระบบปฏิกรณ์แสง (Photocatalytic reactor) ซึ่งชุดระบบปฏิกรณ์แสง (Photocatalytic reactor) สำหรับภายใต้สภาวะที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV)เป็นแหล่งพลังงานต้องเลือกใช้วัสดุที่เป็นแก้วควอตซ์ (Quartz glass) เนื่องจากวัสดุชนิดนี้สามารถให้แสงผ่านเข้าไปในช่วงความยาวคลื่น 1-400 nm และในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 400 nm. จึงมีราคาที่สูง ส่วนชุดระบบปฏิกรณ์แสง (Photocatalytic reactor) สำหรับภายใต้สภาวะที่ใช้แสงวิซิเบิล (Visible, Vis) เป็นแหล่งพลังงาน ต้องเลือกใช้วัสดุที่เป็นแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) เนื่องจากวัสดุชนิดนี้สามารถให้แสงผ่านเข้าไปในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm. จึงมีราคาต่ำกว่า ในการทำชุดระบบปฏิกรณ์แสง (Photocatalytic reactor)

2. การเลือกแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ คือ หลอดไฟอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet light bulb, UV) และหลอดไฟวิซิเบิล (Visible light bulb, Vis) ทั้งสองแหล่งกำเนิดนี้มีราคาไม่ต่างกันแต่หลอดไฟอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet light bulb, UV) มีความอันตรายของรังสีมากกว่า ส่วนหลอดไฟวิซิเบิล (Visible light bulb, Vis) มีความปลอดภัยสามารถมองเห็นได้ด้วยดวงตาของมนุษย์และมีความยาวคลื่น 400-700nm. ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของหลอดไฟที่ใช้กันทั่วไป อาจพัฒนาต่อยอดเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่คุ้มค่าและประหยัดสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการแยกน้ำโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนทุนวิจัยในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างและอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Chiarello, G.L. and E. Selli. 2010. Photocatalytic Hydrogen Production. **Recent Patents on Engineering** 4: 1-15.

Kobwittaya, K., Y. Oishi, T. Torikai, M. Yada, T. Watari and H.N.Luitel. Synthesis and upconversion luminescence properties of ZnO–TiO2 containing $Ho3^{+}$ and Yb3+. **Journal of the Ceramic Society of Japan** 125: 559-564

Navarro, R.M., F. del Valle, J.A.V. de la Mano, M.C. Álvarez-Galván and J.L.G. Fierro. 2009. Photocatalytic water splitting under visible light: Concept and catalysts development. **Advances in Chemical Engineering** 36: 111-143.

Ni, M, M.K.H. Leung, D.Y.C. Leung and K. Sumathy. 2007. A review and recent developments in photocatalytic water-splitting using TiO_2 for hydrogen production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 11: 401-425.

Ni, M., M. Leung, K. Sumathy and D.Y.C. Leung. 2004. Water electrolysis-a bridge between renewable resources and hydrogen. **Proceedings of the International Hydrogen Energy Forum** 1: 475-480.

Sun, T., J. Fan, E. Liu, L. Liu, Y. Wang, H. Dai, Y. Yang, W. Hou, X. Hu and Z. Jiang. 2012. Fe and Ni co-doped TiO_2 nanoparticles prepared by alcohol-thermal method: Application in hydrogen evolution by water splitting under visible light irradiation. **Powder Technology** 228: 210-218.

ประสิทธิภาพของเรือเก็บขยะลอยน้ำในทะเล

Efficiency of Floating Garbage Collecting Boat in Sea

ธุวานนท์ มิ่งเจริญผล[1] สุชีลา พลเรือง[1] และ วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์[1]

Tuwanon Mingjaroenpol[1] , Sucheela Polruang[1] , Varinporn Asokbunyarat[1]

บทคัดย่อ

การออกแบบและสร้างเรือเก็บขยะสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ สร้างเรือเก็บขยะที่ควบคุมจากระยะไกลด้วยระบบรีโมทคอนโทรลแบบไร้สายสำหรับการปฏิบัติงานเก็บขยะที่ผิวน้ำทะเล และศึกษาการทำงานรวมไปถึงประสิทธิภาพของเรือเก็บขยะ ผลการทดสอบประสิทธิภาพเรือเก็บขยะพบว่า ช่วงกำลังของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติงานอยู่ที่ 60% สามารถเคลื่อนที่ในภาวะไร้การบรรทุกด้วยความเร็วสูงสุด 0.51 m/s ในภาวะบรรทุกเต็มพิกัด สามารถเคลื่อนที่ได้ 0.48 m/s ซึ่งการบรรทุกสูงสุดอยู่ที่ไม่เกิน 10 kg/time มีรัศมีการเลี้ยวซ้ายแคบสุดที่ประมาณ 1.9 m และขวา 3.0 m ระยะทางไกลสุดที่สามารถบังคับได้ประมาณ 170 m ในที่โล่งแจ้ง เรือสามารถใช้งานได้ต่อเนื่อง 1 - 1.5 hrs. ขยะลอยน้ำที่สามารถเก็บได้ เช่น ขวดพลาสติก ถุงพลาสติก ขวดแก้ว แก้วพลาสติก จำนวน 12 – 15 pcs ใช้เวลา 1 - 2 min ขึ้นอยู่กับระยะทางของขยะและปัจจัยทางด้านคลื่น

คำสำคัญ: เรือเก็บขยะ, รีโมทคอนโทรล, ประสิทธิภาพ, ขยะ

ABSTRACT

The design and construction of a garbage collecting boat for this research aims to build a remote-controlled garbage collection boat with a wireless remote-control system for garbage collection operations at sea surface. And study the work including the efficiency of the garbage collecting boat. The result of the performance test of the garbage collecting boat found that the optimum motor power range for operations is 60%. Able to move without load at a maximum speed of 0.51 m/s and full load conditions can move 0.48 m/s. Which the maximum loading is not more than 10 kg/time. With the narrowest turning left radius of approximately 1.9m and right 3.0 m. The maximum distance that can be controlled is about 170 m in the open air. The boat can be used continuously for 1 - 1.5 hrs. Floating garbage that can be collected such as plastic bottles, plastic bags, glass bottles, plastic glass in the amount of 12 - 15 pcs takes 1 - 2 min, depending on the distance of the garbage and the wave factors.

Key word: Garbage Collecting Boat, Remote-control, Efficiency, Garbage

* Corresponding author; e-mail address: Loewe.TWN@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

โลกของเรานั้นมีประชากรเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นปัญหาที่ตามมาคือเรื่องของขยะที่มีอยู่มากมาย เนื่องจากคนบางกลุ่มมักทิ้งขยะไม่เป็นที่ จึงทำให้เกิดมลพิษขึ้น ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางน้ำหรือทางอากาศก็ตาม ซึ่งปลายทางของขยะเหล่านั้นมักลงสู่ทะเลในที่สุด อีกทั้งขยะบางชนิดมีการย่อยสลายได้ยาก อาจใช้เวลานานกว่า 450 ปี (Jain *et al.*, 2017) โดยขยะทางทะเลไม่เพียงรบกวนความงามของทิวทัศน์สำหรับผู้อยู่อาศัยและนักท่องเที่ยวเท่านั้น แต่มันเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญมากที่จะส่งผลต่อการบริโภค การดำรงชีวิตอยู่ทางทะเลของมนุษย์และสัตว์ท้องถิ่นที่อาศัยอยู่ ปัญหาขยะทะเลส่งผลกระทบต่อทั้งชายหาดทะเล และชายฝั่งทะเลที่อยู่ติดกับพื้นดิน การเพิ่มขึ้นของของเสียทางทะเลมีสาเหตุมาจากปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่นนิเวศวิทยา วัฒนธรรม ภาวะเศรษฐกิจสังคม โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ (Ocean Conservancy, 2009)

การพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทยอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา ส่งผลให้ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศผู้นำด้านเศรษฐกิจ มีการเจริญเติบโตของโรงงานอุตสาหกรรมมากมาย อย่างไรก็ตามการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศยังคงต้องอาศัยทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญในการผลิต และผลจากการพัฒนาเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ทำให้ชุมชนเมืองมีการขยายตัว มีการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมและการท่องเที่ยว ส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเกินศักยภาพในการรองรับของระบบนิเวศ ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ทรัพยากรธรรมชาติขาดความอุดมสมบูรณ์ สิ่งแวดล้อมมีคุณภาพเสื่อมโทรมอย่างต่อเนื่อง และทำให้เกิดผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของประชาชน

ผู้วิจัยได้เห็นถึงความสำคัญของปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการสร้างอุปกรณ์สำหรับเก็บขยะที่ผิวน้ำทะเลขึ้นมา คือ เรือเก็บขยะ ซึ่งเรือลำนี้มีคุณสมบัติในการควบคุมระยะไกล ตามการออกคำสั่งผ่านระบบ รีโมทคอนโทรลและตัวเรือมีมอเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนเรือเก็บขยะนี้มีความสามารถในการรวบรวมขยะที่ลอยอยู่บนพื้นผิวน้ำทะเล เช่น ถุงพลาสติก ขวดพลาสติก แก้วพลาสติก ขวดแก้ว ภาชนะบรรจุอาหาร และขยะอื่น ๆ โดยที่ความสามารถในการเก็บขยะแต่ละชนิดจะมีปัจจัยขึ้นอยู่กับขนาดความถี่ช่องตะแกรงในห้องบรรจุขยะของตัวเรือ และพฤติกรรมการลอยของชนิดขยะที่ผิวน้ำ การใช้เรือสำหรับเก็บขยะมีข้อดีคือ การปฏิบัติงานในการเก็บขยะที่ผิวน้ำมีความง่ายมากขึ้น ผู้ปฏิบัติงานไม่ต้องลงเรือเพื่อไปเก็บขยะด้วยตัวเอง อีกทั้งยังสร้างความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน (ประภาภรณ์ และคณะ, 2559)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การออกแบบวงจรสำหรับการขับเคลื่อนเรือ

วงจรการขับเคลื่อนของเรือจะมีด้วยกันอยู่ 2 ชุด ซึ่งแยกออกจากกันอย่างชัดเจน โดยทำการติดตั้งวงจรไว้ที่ทุ่นของเรือทั้ง 2 ข้าง ข้างละ 1 ชุด สำหรับการเลี้ยวบังคับซ้าย-ขวา และจะมี Servo motor เพื่อตัดการทำงานของวงจรข้างใดข้างนึง เมื่อมีการสั่งบังคับเลี้ยว แต่หากไม่มีการบังคับเลี้ยว มีเพียงแค่การบังคับเดินหน้าหรือถอยหลังตรงๆ เพียงอย่างเดียว วงจรการทำงานของเรือจะทำพร้อมกันทั้ง 2 ข้าง ซึ่งแหล่งพลังงานที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อนของเรือนั้นมาจาก Battery ขนาด 12V 9Ah ที่จ่ายไฟไปยัง Speed control motor เพื่อสั่งการให้ DC motor เกิดการทำงาน และใบพัดของเรือจึงหมุนในที่สุด (Figure 1)

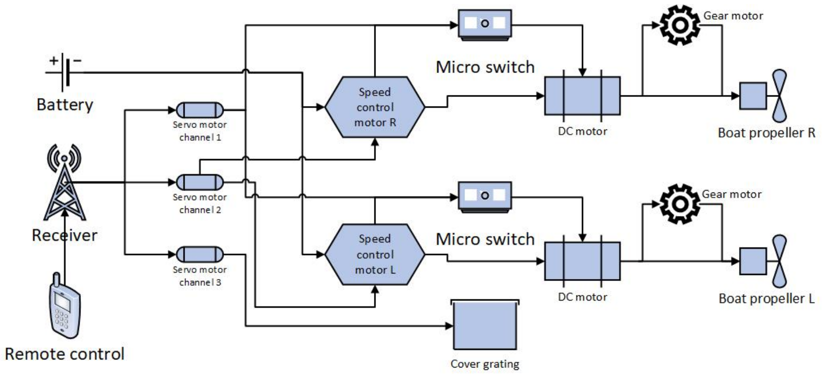


Figure 1 Circuit diagram of a garbage collecting boat by a remote-control system.

2. การออกแบบส่วนต่างๆ ของเรือ

2.1 การออกแบบโครงสร้าง

ลักษณะของเรือจะมีทุ่น 2 ข้าง ซ้าย-ขวา ที่ใช้สำหรับการลอยตัวของเรือ โดยจะมีโครงอลูมิเนียมยึดติดเข้าด้วยกัน ซึ่งทุ่นของเรือทั้ง 2 ข้างนั้นถูกสร้างจากอะคริลิกใสที่มีความหนา 3 mm ทำการขึ้นรูปในลักษณะด้านหน้ามีความโค้งเข้าหากึ่งกลางเรือ มีความยาว 80 cm กว้าง 15 cm และด้านหลังเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมที่ทำมุมเข้าหากึ่งกลางเรือ มีขนาด 65 องศา (Figure 2) และเจาะรูสำหรับติดตั้งใบพัดเรือไว้ที่ด้านท้ายของทุ่นทั้ง 2 ข้างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 42 mm (Figure 3) โครงสร้างอะลูมิเนียมออกแบบในลักษณะโครงถักสำหรับยึดติดทุ่นทั้ง 2 ข้างไว้ด้วยกัน อะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับทำโครงสร้างขนาด 1.25×1.25 mm หนา 2 mm ความยาวของโครงอะลูมิเนียมจากด้านหน้าถึงด้านหลัง 44.5 cm กว้าง 55 cm (Figure 4) ขนาดของตะแกรงสำหรับใส่ขยะกว้าง 54.20 cm ยาว 50 cm สูง 17 cm ขนาดรูตะแกรง 4×4 cm ความจุสำหรับใส่ขยะรวมคือ 46 L (Figure 5)

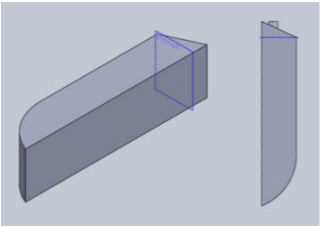


Figure 2 Boat buoys.

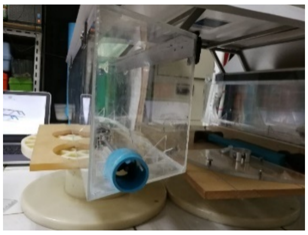


Figure 3 Hole for boat propeller.

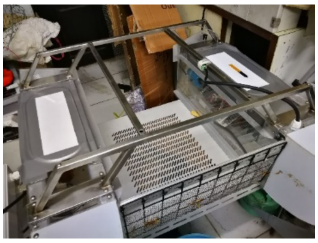


Figure 4 Aluminum structures.

Figure 5 Waste sieve.

2.2 การสั่งการผ่านระบบ Remote control

การบังคับของเรือจะทำการบังคับจาก Remote control ที่จะปล่อยคลื่นความถี่ของสัญญาณ Radio ที่ 2.4 GHz ซึ่งที่เรือนั้น ก็จะได้รับการติดตั้งตัวรับสัญญาณจาก Remote control หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Radio

receiver ที่คลื่นความถี่ 2.4 GHz. (Figure 6) และตัว Radio receiver นี้เอง จะมีหน้าที่ควบคุมการทำงานของ channel 1, channel 2 และ channel 3 ตามลำดับ

Channel 1 เป็นช่องสัญญาณสำหรับสั่งการ Servo motor ให้เปิด – ปิด ระบบของ Micro switch (Figure 7) ซึ่งเป็นตัวตัดการทำงานของมอเตอร์ข้างใดข้างนึงเมื่อมีการสั่งบังคับเลี้ยว

Channel 2 เป็นช่องสัญญาณสำหรับสั่งการทำงานของ Speed control motor (Figure 8) ที่เป็นตัวสั่งการให้ DC motor เกิดการทำงาน

Channel 3 เป็นช่องสัญญาณสำหรับสั่งการ Servo motor (Figure 9) เพื่อเปิด – ปิด ฝาหน้าของตะแกรงที่ใช้ในการกักเก็บขยะไว้ในเรือ

Figure 6 Remote Control and Radio Receiver.

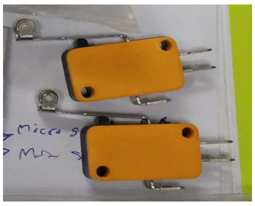


Figure 7 Micro Switch.

Figure 8 Speed control motor.

Figure 9 Servo motor.

3. การทดสอบและประเมินผล

ทำการทดสอบหาศักยภาพสูงสุดของเรือเก็บขยะ ที่สามารถทำได้ในแหล่งน้ำนิ่งที่ไม่มีปัจจัยภายนอกมารบกวน ซึ่งจะแบ่งช่วงการทดลองเป็น 3 ช่วง คือ ทดลองที่ช่วงกำลังของมอเตอร์ที่ 50%, 60% และ 70% เพื่อหาค่ากำลังมอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด และการทดสอบจะทำเพื่อหาประสิทธิภาพของเรือในด้านต่างๆ ดังนี้ 1. ความเร็วสูงสุดของเรือขณะที่ไม่มีภาระบรรทุก ความเร็วสูงสุดของเรือขณะมีภาระบรรทุก และความสามารถในการบรรทุกขยะสูงสุด 2. รัศมีการเลี้ยวแคบสุดของเรือ 3. เวลาที่สามารถทำได้ต่อการเคลื่อนที่ไปในจุดต่างๆ รอบทิศทางของเรือ 4. ระยะบังคับเรือไกลสุดที่สามารถทำได้ 5. ทดสอบการเก็บขยะเสมือนจริงที่แหล่งน้ำทะเล

4. วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวมจะเกี่ยวกับต้นทุนในการใช้งานเรือเก็บขยะ โดยสมมุติว่าใช้เรือเก็บขยะแทนการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเรือเก็บขยะ ได้ 5 years) ค่าเงินกู้ในการลงทุน (คิดดอกเบี้ยที่ 6.875%) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดดอกเบี้ยที่ 0.5%) ซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ทั้งหมด จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการเก็บขยะในทะเล และต้นทุนแปรผัน (Hunt, 2008) หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงงานคน และหาจุดคุ้มทุนของเรือเก็บขยะ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวัดประสิทธิภาพของเรือในด้านความเร็วของเรือ

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของเรือเก็บขยะ ได้ทำการทดลองในแหล่งน้ำที่เป็นน้ำนิ่งซึ่งหากมีตัวแปรอื่นเข้ามา เช่น ลม คลื่น อาจทำให้กระแสน้ำเปลี่ยนแปลงไป ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน ซึ่งผลการทดสอบในด้านความเร็วสูงสุดขณะที่ไม่มีภาระบรรทุก (Table 1)

Table 1 Control the boat at a constant speed by forcing forward and start the timer at the 0 m point to finish at 5 m.

% Motor power	Experiment 1 (sec)	Experiment 2 (sec)	Experiment 3 (sec)	Average time (sec)	Top speed (m/s)
50%	9.71	11	10.69	10.47	0.48
60%	9.65	9.69	9.79	9.71	0.51
70%	9.25	9.82	9.02	9.36	0.53

ทดสอบความเร็วเรือสูงสุดขณะที่มีภาระบรรทุก โดยได้เลือกทดลองที่กำลังมอเตอร์ 60% (Table 2)

Table 2 Control the boat at a constant speed by forcing forward with the increase of the load.

Loading (kg)	Experiment 1 (sec)	Experiment 2 (sec)	Experiment 3 (sec)	Average time (sec)	Top speed (m/s)
4	7.91	7.49	7.66	7.69	0.52
6	8.02	8	8.33	8.12	0.49
10	8.38	8.33	8.31	8.34	0.48

การหาภาระบรรทุกสูงสุดของเรือ พบว่า อยู่ที่ 10 kg เนื่องจากเต็มความจุของตะแกรง (46 L)

ทดสอบรัศมีการเลี้ยวซ้ายและขวาแคบสุด

ซึ่งจะทำการทดลองบังคับควบคุมซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละด้าน และหาค่าเฉลี่ย (Table 3)

Table 3 Control the boat, turn left and right by beginning from 0 m to the end point.

Experiment	Left turning radius (m)	Average left turning radius (m)	Right turning radius (m)	Average right turning radius (m)
1	2		3	
2	1.9	1.9	3	3
3	1.8		3	

ทดสอบหาระยะเวลาที่ใช้ต่อการเคลื่อนไปตำแหน่งต่าง ๆ

โดยใช้กำลังมอเตอร์ที่ 60% กำหนดระยะห่างระหว่างจุดเป้าหมายกับเรือเก็บขยะ 1 m (Table 4, Figure 10) ซึ่งมีลักษณะการทดลองดังต่อไปนี้ (Figure 11)

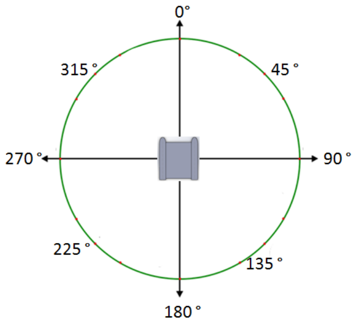


Figure 10 The position of the target point is 8 degrees.

Table 5 Control the boat to the specified position by controlling the boat within an area of 1 m radius.

Position (degree)	Experiment 1 (sec)	Experiment 2 (sec)	Experiment 3 (sec)	Average time (sec)
0	4.53	3.88	4.56	4.32
45	4.40	5.18	4.47	4.68
90	10.69	9.00	9.56	9.75
135	14.12	14.03	13.12	13.75
180	14.06	15.10	15.34	14.83
225	15.59	15.63	15.65	15.62
270	9.44	8.35	9.00	8.93
315	4.82	6.40	5.75	5.66

Figure 11 Picture of a test to force turning to different positions.

ทดสอบระยะที่สามารถบังคับใช้งานได้ของเรือเก็บขยะ

โดยวิธีการคือ วางเรือไว้ในจุดที่เป็นพื้นที่โล่งไม่มีสิ่งกีดขวาง มาบดบังสัญญาณของรีโมทบังคับ และหลังจากนั้นจะทำการเดินออกห่างจากเรือออกไปเป็นแถวตรง โดยมีการวัดระยะทุกๆ 10 m แล้วกดบังคับเรือ พบว่าระยะการควบคุมเรือเก็บขยะได้ไกลที่สุดในที่โล่งอยู่ที่ 170 m ถ้าหากเกินกว่านี้การควบคุมเรือจะมีอาการติดขัด สัญญาณขาดหายทำให้ไม่สามารถบังคับเรือได้อย่างต่อเนื่อง

ทดสอบการเก็บขยะเสมือนจริงที่แหล่งน้ำทะเล

วิธีการทดลองโดยการเก็บขยะที่พบเห็นโดยทั่วไปในทะเลจากการสำรวจเบื้องต้น ขยะที่พบเห็นบ่อยในทะเลคือ ขวดน้ำพลาสติก ถุงพลาสติก ขวดแก้ว แก้วพลาสติก ถ้วยโฟม หลอดพลาสติก (Table 5, Figure 12)

Table 6 Try to collect 6 types of simulated waste collection in the designated area.

Boat garbage collection experiment results			
Garbage type	Garbage size	Quantity (pcs)	Experimental results
Plastic water bottle	600 ml	12	The experiment was done 2 times, taking a total of 91 sec and 88 sec. The average is 90 sec, representing 7.5 sec / pc
Plastic bag	4”x6”, 6”x9”, 7”x11”, 9”x18”	12	The experiment was done 2 times, taking a total of 40 sec and 67 sec. The average is 54 sec, representing 4.5 sec/pc
Glass bottle	150 ml	12	The experiment was done 2 times, taking a total of 94 sec and 90 sec. The average is 92 sec, representing 7.67 sec/pc
Plastic glass	Ø8.5 cm 14oz.	15	The experiment was done 2 times, taking a total of 97 sec and 124 sec. The average is 111 sec, representing 7.4 sec/pc
Foam cup	Ø10 cm 280 ml	12	The experiment was done 2 times, taking a total of 85 sec and 93sec. The average is 89 sec, representing 8.9 sec/pc
Drinking straws	Ø0.7 cm x L 20 cm	12	Can't keep Because the size of the tube is smaller than the sieve hole

Figure **12** Test for garbage collection at sea.

ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์ของ เรือเก็บขยะในทะเล

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยคิดที่ ราคาเรือเก็บขยะ 25,000 baht อายุการใช้งาน 5 yrs อัตราดอกเบี้ยเงินกู้คิดที่ 6.875% และมีการคิดค่าเสื่อมราคาของอุปกรณ์ ใช้ผู้ควบคุมเครื่อง 1 คน (ค่าแรง 500 baht/day) โดยประเมินว่าความสามารถสูงสุดในการทำงานของเรือเก็บขยะต่อ 1 hr อยู่ที่ 53.75 kg (รวมเวลาเก็บขยะ บังคับเรือเข้าฝั่ง ขนถ่ายขยะจากเรือ บังคับเรือไปเก็บขยะรอบถัดไป ทั้งนี้เป็นปริมาณขยะสูงสุดที่เก็บได้เมื่อขยะมีมากเพียงพอ) เท่ากับ 430 kg ต่อเวลาทำงาน 8 hrs (หรือคิดเป็นปริมาณขยะที่สามารถเก็บได้สูงสุด 430 kg/day) และมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดจากการใช้เรือเก็บขยะอยู่ที่ 541.22 baht/day หรือคิดเป็น 1.26 baht/kg ในขณะที่ถ้าใช้แรงงานคนในการเก็บขยะในปริมาณเท่ากัน (430 kg) ค่าใช้จ่ายจะอยู่ที่ 1340 baht/day หรือคิดเป็น 3.12 baht/kg โดยคิดจากค่าแรงงานคน จำนวน 4 คน คนละ 335 baht/day และเก็บขยะในน้ำได้คนละ 110 kg/day (Samseemoung *et al.*, 2016) ดังนั้นถ้าใช้เรือเก็บขยะแทนแรงงานคนจะสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ 798.78 baht/day และสามารถคืนทุนภายในระยะเวลา 31.30 day หรือประมาณ 1 month

สรุป

เรือเก็บขยะที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาเรือเวอร์ชันถัดไป โครงสร้างของเรือทำจากอะลูมิเนียมขนาด 1.25×1.25 cm หนา 2 mm ยึดเข้ากับทุ่นของเรือ ซึ่งในตัวทุ่นทำจากอะคริลิค และภายในทุ่นมีช่องสำหรับใส่วงจรและแบตเตอรี่ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการขับเคลื่อนให้ใบพัดเรือทำงาน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้งหมดถูกควบคุมด้วยรีโมทคอนโทรล ระยะการควบคุมเรือประมาณ 170 m กำลังมอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานอย่างปลอดภัยคือ 60% มีความสามารถการทำงานอยู่ที่ 53.75 kg/hr มีค่าใช้จ่ายในการทำงานอยู่ที่ 541.22 baht/day หรือคิดเป็น 1.26 baht/kg และจะมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ประมาณ 1 month (กรณีทำงานเต็มเวลาที่ 8 hrs/day) เห็นได้ชัดว่าเรือเก็บขยะนั้นมีประสิทธิภาพและความสามารถในการทำงานที่สูงกว่าแรงงานคน ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ของเรือขณะไม่มีภาระบรรทุกประมาณ 0.51 m/s มีรัศมีการเลี้ยวซ้ายแคบสุดที่ประมาณ 1.9 m และขวา 3.0 m การเก็บขยะขึ้นจากน้ำแต่ละครั้งไม่เกิน 10 kg เนื่องจากเต็มความจุของตะแกรง เวลาในการเก็บขยะแต่ละครั้งประมาณ 4.50 – 8.90 sec/pc ขึ้นอยู่กับระยะทางของขยะ หากมีปัจจัยทางด้านคลื่นลมมาเกี่ยวข้องจะทำให้ขยะลอยไปไกลต้องใช้เวลาในการเก็บที่เพิ่มขึ้น อาจทำให้ขยะลอยไปไกลเกินกว่าที่ผู้ปฏิบัติงานจะมองเห็น ทำให้ไม่สามารถเก็บขยะชิ้นดังกล่าวได้ และหากชนิดของขยะที่ทำการเก็บมีขนาดที่เล็กกว่ารูของตะแกรงจะส่งผลให้ขยะที่เก็บหลุดลอดออกมาตามช่องดังกล่าวได้ แบตเตอรี่สำหรับการใช้งานเรือขนาด 12V18Ah จ่ายแรงดันไฟให้กับมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ใช้งานได้ประมาณ 1 – 1.5 hrs ในการประจุแบตเตอรี่แต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 4 hrs. น้ำหนักเรือเก็บขยะขณะไม่มีภาระบรรทุกประมาณ 20 kg

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนสำหรับการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ประภาภรณ์ เพชรสม อิสระพงศ์ พูลสุข และประกาศิต ตันติอลงการ. 2559. การศึกษาเรือเก็บขยะควบคุมแบบไร้สาย. **SNRU Journal of Science and Technology** 8(3): 309-318.

Hunt, D. 2008. **Farm Power and Machinery Management.** Waveland Press.

Jain, P., A. Jain, R. Singhai and S. Jain. 2017. Effect of Biodegradation and Non-Degradable Substances in Environment. **International Journal of Life Sciences** 1: 58-64.

Ocean Conservancy. 2009. **A Rising Tide of Ocean Debris and What We Can Do About It.** Washington, DC.

Samseemoung, G., J. Bhucksasri, P. Tuenpusa and W. Moocharoen. 2016. Design and fabrication of remote controlled garbage collecting boat for agricultural water resources. **Thai Society of Agricultural Engineering Journal** *22*(2).

การประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์พร้อมทั้งแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสมสำหรับการจัดประชุมสีเขียวในประเทศไทย

Environmental and Economic Assessment along with Appropriate Practice for Green Meeting in Thailand

กรรณิการ์ สรกล[1]* และ จีมา ศรลัมพ์ [1]

Kannika Sorakon[1*] and Cheema Soralump[1]

บทคัดย่อ

แนวทางการปฏิบัติที่เหมาะสมสำหรับการจัดประชุมสีเขียวเป็นสิ่งที่ช่วยกระตุ้นให้เกิดการนำไปปฏิบัติจริงในทุกองค์กร จากการสำรวจความสามารถในการดำเนินการ 5 ขั้นตอนหลัก คือ 1) การเชิญประชุม 2) การจัดเตรียมเอกสาร 3) การจัดเตรียมสถานที่และอุปกรณ์ 4) การจัดเตรียมอาหารและเครื่องดื่ม และ 5) การจัดเตรียมอื่นๆ โดยใช้แบบสอบถามและการสัมภาษณ์เชิงลึก พบว่า การจัดเตรียมเอกสาร ในส่วนของการจัดพิมพ์เอกสารเป็นสีขาว-ดำ สามารถทำได้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 60.24 ส่วนการประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ของการจัดประชุมสีเขียว 3 กรณีศึกษา พบว่า กรณีศึกษาที่ 1 2 และ 3 ช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก เมื่อเทียบกับการประชุมทั่วไป คิดเป็นร้อยละ 38.76, 24.54 และ 0.17 ตามลำดับ และลดค่าใช้จ่ายจากการดำเนินการ จำนวน 472, 303 และ 147 บาท ตามลำดับ ซึ่งผลกระทบที่ลดลงดังกล่าวจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดำเนินการของแต่ละหน่วยงาน

ABSTRACT

An appropriate practice for green meeting is essential to motivate the implementation in organization. Based on the operating capability survey, It is divided in to five main steps, 1) meeting invitation 2) meeting document arrangement 3) venue and equipment preparation 4) Food and beverage arrangement and 5) other arrangements. The methods use questionnaires and in-depth interviewing. The result found that meeting document arrangement, printing document in black and white is the main step in operating capability, accounting for 60.24%. Moreover, the research conduct three case studies on assessing environmental and economic benefits. The result found that green meeting reduces greenhouse gas emission, compared to common meetings of case study 1, 2, and 3, representing 38.76%, 24.54%, and 0.17%, respectively. Also, reduce operating cost for 472, 303 and 147 baht respectively. These impacts depend on operating capability of each organization.

Key words: green meeting, best practice, environmental assessment, economic assessment

* Corresponding author; e-mail address: **Skannika.cma@gmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การประชุม คือ กิจกรรมของบุคคลกลุ่มหนึ่งซึ่งได้มารวมตัวกันตามกำหนดนัดหมาย โดยมีวัตถุประสงค์ต่างๆ กัน เช่น เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิด เพื่อแก้ปัญหา เป็นต้น (Dcbsdcon, 2562) ทั้งนี้อาจเป็นในรูปแบบที่เป็นการประชุมโดยทั่วไป การสัมมนา หรือการจัดกิจกรรมต่างๆ โดยกิจกรรมดังกล่าวมักมีการใช้ทรัพยากรและก่อให้เกิดของเสียจำนวนมาก อันเป็นผลกระทบทางลบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ สำนักงานส่งเสริมการจัดการประชุมและนิทรรศการ (องค์การมหาชน) (สสปน).หรือ Thailand Convention & Exhibition Bureau (TCEB) ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว จึงได้นำหลักการ Sustainable event มาประยุกต์ใช้ใน "การจัดประชุมอย่างยั่งยืน" และพัฒนาแนวทางการจัดประชุมสีเขียว (Green meeting) เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินการ ประกอบกับ องค์กรธุรกิจเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Thailand Business Council for Sustainable Development - TBCSD) และสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย ได้จัดทำแนวทางการจัดประชุมสีเขียวในองค์กร ซึ่งไม่พิจารณาการเดินทางและการจ่ายค่าตอบแทนสำหรับการใช้บริการสถานที่จัดประชุม โดยเผยแพร่แนวทางการจัดประชุมสีเขียวในองค์กรและส่งเสริมการนำไปปฏิบัติ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งการลดการใช้ทรัพยากรและพลังงาน การลดปริมาณขยะและของเสียที่เกิดขึ้น ตลอดจนการสนับสนุนให้มีการนำผลิตภัณฑ์หรือวัสดุที่ทิ้งแล้วกลับมาใช้ประโยชน์

การดำเนินการที่ผ่านมา แม้ว่าจะมีการเผยแพร่แนวทางการปฏิบัติและส่งเสริมความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการประชุมสีเขียวแล้ว แต่การรับรู้และความสนใจในการนำแนวทางการดำเนินการไปสู่การปฏิบัติในประเทศไทยก็ยังไม่แพร่หลายมากนัก ประกอบกับไม่ได้มีการทบทวนเพื่อปรับปรุงแนวทางการปฏิบัติให้เหมาะสมยิ่งขึ้น (นงค์นุช ศรีธนาอนันต์, 2559) การศึกษาครั้งนี้จึงทำการสำรวจความคิดเห็นและความสามารถในการดำเนินการจัดประชุมสีเขียว การประเมินผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ พร้อมทั้งทางเลือกและแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสมสำหรับการจัดงานประชุมสีเขียว เพื่อกระตุ้นให้เกิดการนำไปปฏิบัติอันเป็นการส่งเสริมการจัดประชุมสีเขียวอย่างยั่งยืน และเกิดการพัฒนาแบบองค์รวมครอบคลุมในสามมิติ คือ เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาทางเลือกและแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสมสำหรับการจัดงานประชุมสีเขียวนี้ จะกำหนดกรณีศึกษา 3 กรณีจาก 3 หน่วยงาน ครอบคลุม หน่วยงานภาครัฐ สถาบันการศึกษา และหน่วยงานภาคเอกชน โดยการศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การสำรวจความคิดเห็นและความสามารถในการดำเนินการตามแนวทางการจัดประชุมสีเขียว

สำรวจความคิดเห็นและความสามารถในการดำเนินการจากการตอบแบบสอบถามของผู้จัดประชุม ผู้เข้าร่วมประชุม และผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องอื่นๆ รวมถึงการสัมภาษณ์เชิงลึก โดยใช้คำถามปลายเปิด สำหรับผู้จัดประชุม และผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบปัจจัยและอุปสรรคในการดำเนินการจัดประชุมสีเขียว โดยแบบสอบถามแบ่งเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 แบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม เช่น เพศ อายุ และ อาชีพ เป็นต้น

ตอนที่ 2 แบบสอบถามเกี่ยวกับความคิดเห็นและความสามารถในการดำเนินการจัดประชุมสีเขียวในองค์กร โดยแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน คือ 1) การเรียนเชิญ และการประชาสัมพันธ์ 2) การจัดเตรียมเอกสาร 3) การจัดเตรียมสถานที่และอุปกรณ์ 4) การจัดเตรียมอาหารและเครื่องดื่ม และ 5) การจัดเตรียมอื่นๆ ลักษณะแบบสอบถามเป็นแบบปรนัย ประกอบด้วย 5 ตัวเลือก กล่าวคือ ทำไม่ได้ ทำได้น้อย ทำได้ปานกลาง ทำได้มาก และทำได้มากที่สุด ทั้งนี้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาให้น้ำหนักของคะแนน 1-5 คะแนน ตามลำดับ

ส่วนที่ 2 การประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์

การประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมนั้นจะพิจารณาจากปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดลง ในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าแฟคเตอร์ดังตารางที่ 1 และบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมที่ถูกกำหนดจากกิจกรรมที่คาดว่าจะสามารถลดก๊าซเรือนกระจกได้ ครอบคลุมตั้งแต่ การใช้ทรัพยากรและพลังงาน ตลอดจนการกำจัดของเสีย โดยเปรียบเทียบระหว่างการจัดประชุมทั่วไปกับการจัดประชุมสีเขียว

Table 1 Emission Factor for calculation of greenhouse gas emissions.

List	Emission Factor ($kgCO_2eq$)	List	Emission Factor ($kgCO_2eq$)
Resource and energy use		Waste management	
Electricity	0.5821	Paper / Paper boxes	2.93
Paper	1.8974	Plastic	2.32
Plastic	0.702	Food waste	2.53
Paper boxes	2.636		

Source: (Thailand Greenhouse Gas Management Organisation (TGO), 2019)

การประเมินผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ จะพิจารณาจากผลต่างของค่าใช้จ่ายระหว่างการจัดประชุมทั่วไปกับการจัดประชุมสีเขียว โดยกำหนดกิจกรรมที่ก่อให้เกิดผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ รวบรวมข้อมูลและคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้ ในหน่วย บาท (ไทย) ในรูปตัวเงิน

ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

การสำรวจความคิดเห็นและความสามารถในการดำเนินการตามแนวทางการจัดประชุมสีเขียวในองค์กร รวมถึงการประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ของ 3 กรณีศึกษา กล่าวคือ กรณีศึกษา 1 การอบรมพนักงานประจำเดือนกันยายน 2562 ของศูนย์เอนเนอร์ยี่คอมเพล็กซ์ ในวันที่ 27 กันยายน 2562 เวลา 13.00-17.00 น โดยมีผู้เข้าร่วมประชุม 40 คน กรณีศึกษาที่ 2 ประชุมคณะกรรมการประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำเดือน พฤศจิกายน 2562 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในวันที่ 6 พฤศจิกายน 2562 เวลา 13.30-16.30 น โดยมีผู้เข้าร่วมประชุม 37 คน และกรณีศึกษาที่ 3 สัมมนาเรื่อง การจัดการความรู้ (Knowledge Management: KM) เพื่อพัฒนาศักยภาพบุคลากรในการดำเนินงานด้านความหลากหลายทาง

ชีวภาพ ของสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ในวันที่ 29 ตุลาคม 2562 เวลา 08.30-15.00 น โดยมีผู้เข้าร่วมประชุม 70 คน นอกจากนี้ยังมีการส่งแบบสอบถามออนไลน์ไปยังสื่อออนไลน์ต่างๆ โดยผลการศึกษามีดังนี้

ผลการสำรวจความคิดเห็นและความสามารถในการดำเนินการตามแนวทางการจัดประชุมสีเขียว

จากการสำรวจผู้จัดประชุมซึ่งมีผู้ตอบแบบสอบถามจำนวน 84 คน เป็นเพศชายร้อยละ 14.29 และเพศหญิง ร้อยละ 85.71 อาชีพส่วนใหญ่เป็นข้าราชการ/พนักงานในหน่วยงานภาครัฐ รองมาคือ พนักงานในองค์กร/หน่วยงานเอกชน อาจารย์หรือเจ้าหน้าที่ในสถานศึกษา นักเรียน/นักศึกษา และอาชีพอื่นๆ คิดเป็นร้อยละ 61.91, 15.48, 10.71, 7.14 และ 4.76 ตามลำดับ โดยการศึกษาแบ่งเป็น 5 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การเรียนเชิญ และการประชาสัมพันธ์ จากการสำรวจความสามารถในการดำเนินการพบว่า การลงทะเบียนออนไลน์ หรือการส่งแบบตอบรับการเข้าร่วมการประชุมทางอีเมล์หรือทางโทรศัพท์ มีคะแนนสูงสุด กล่าวคือ 4.14 คะแนน (คะแนนเต็ม 5 คะแนน) โดยผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เลือกว่าสามารถดำเนินการได้มาก คิดเป็นร้อยละ 46.99 รองมาคือ การใช้อีเมล์ในการส่งจดหมายเชิญ การประชาสัมพันธ์ผ่านทางเว็บไซต์ อินทราเน็ต หรือจดหมายข่าว การระบุในจดหมายเชิญว่าเป็นการจัดประชุมตามหลักการ Green Meeting และการแจ้งให้ผู้เข้าร่วมประชุมงดสวมเสื้อสูทและเสื้อนอกระหว่างการประชุม โดยเมื่อสัมภาษณ์เชิงลึกพบว่า การใช้อีเมล์ในการส่งจดหมายเชิญและการประชาสัมพันธ์ผ่านทางเว็บไซต์ อินทราเน็ต หรือจดหมายข่าวนั้น จำเป็นต้องมีการติดตามอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหากมีหัวข้อประชาสัมพันธ์หรืออีเมล์จำนวนมาก อาจทำให้ผู้เข้าร่วมประชุมพลาดการรับรู้ข่าวสารการประชุมได้ ส่วนแนวทางที่มีระดับคะแนนน้อยที่สุดคือ การงดสวมเสื้อสูทและเสื้อนอกระหว่างการประชุม มีคะแนน 3.55 คะแนน (คะแนนเต็ม 5 คะแนน) โดยผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เลือกว่าสามารถดำเนินการได้ปานกลาง คิดเป็นร้อยละ 39.76 ซึ่งสอดคล้องกับการสำรวจความคิดเห็นของผู้เข้าร่วมประชุม ที่มีการตอบแบบสอบถามจำนวน 62 คน พบว่า ผู้เข้าร่วมประชุมเห็นด้วยเพียงร้อยละ 46.7 โดยผู้ที่ไม่เห็นด้วยส่วนใหญ่มักมาจากหน่วยงานของรัฐ หน่วยงานที่มีรูปแบบปฏิบัติที่เป็นทางการ หรือเกิดจากวัฒนธรรมองค์กร ของหน่วยงานนั้นๆ

ในส่วนที่ 2 การจัดเตรียมเอกสาร พบว่า การจัดพิมพ์เอกสารการประชุมที่เป็นสีขาว-ดำ มีคะแนนสูงสุด กล่าวคือ 4.52 คะแนน (คะแนนเต็ม 5 คะแนน) โดยผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เลือกว่าสามารถดำเนินการได้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 60.24 รองมาคือ การจัดพิมพ์เอกสารทั้ง 2 หน้า การจัดทำเอกสารการประชุมเฉพาะที่จำเป็น พยายามสรุปข้อมูลให้สั้น กระชับ และได้ใจความ การจัดพิมพ์สไลด์นำเสนอ 4-6 สไลด์/หน้า การเตรียมไฟล์เพื่อให้ผู้เข้าร่วมประชุมสามารถดาวโหลดได้จากอินเทอร์เน็ต และการเลือกใช้กระดาษรีไซเคิล ตามลำดับ แม้ว่าการจัดทำเอกสารการประชุมเฉพาะที่จำเป็น พยายามสรุปข้อมูลให้สั้น กระชับ และได้ใจความ จะเป็นวิธีปฏิบัติพื้นฐานของการจัดประชุม แต่ผู้ตอบแบบสอบถามที่เลือกว่าสามารถดำเนินการได้มากที่สุด มีเพียงร้อยละ 44.58 อาจเนื่องจากขาดการวางแผนและระยะเวลาที่จำกัด ซึ่งหากมีการวางแผนที่ดีจะช่วยให้การประชุมมี

ประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้มีการจัดพิมพ์เอกสารการประชุมที่น้อยลง ช่วยลดการใช้กระดาษ ตลอดจนลดการใช้พลังงานอันเนื่องจากการใช้เวลาในการประชุมที่สั้นลง

ส่วนที่ 3 การจัดเตรียมสถานที่และอุปกรณ์ พบว่า การเลือกห้องประชุมให้เหมาะสมกับจำนวนผู้เข้าร่วมการประชุม มีคะแนนสูงสุด กล่าวคือ 4.37 คะแนน (คะแนนเต็ม 5 คะแนน) โดยผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เลือกว่าสามารถดำเนินการได้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 48.78 รองมาคือ การกำหนดและปรับตั้งอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศไว้ที่ 25-26 องศาเซลเซียส การเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าประหยัดพลังงานและมีประสิทธิภาพสูง การใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มาตกแต่งสถานที่ และการเตรียมถังขยะที่สามารถแยกประเภทสำหรับขยะรีไซเคิล และขยะมูลฝอยทั่วไปอย่างเพียงพอและชัดเจน ตามลำดับ จากผลการสำรวจข้างต้นประกอบกับการสัมภาษณ์เชิงลึก พบว่า การแยกขยะยังเป็นประเด็นที่มีปัญหามากที่สุด ซึ่งจำเป็นต้องมีการให้ความรู้ความเข้าใจ สร้างความตระหนักเพื่อให้เกิดการปรับเปลี่ยนพฤติกรรม ตลอดจนการจัดเตรียมอุปกรณ์สนับสนุนให้พร้อม เพื่อให้สามารถคัดแยกขยะประเภทต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ส่วนที่ 4 การจัดเตรียมอาหารและเครื่องดื่ม พบว่า การสนับสนุนวัตถุดิบสำหรับเตรียมอาหารและเครื่องดื่มที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น มีคะแนนสูงสุด กล่าวคือ 4.23 คะแนน (คะแนนเต็ม 5 คะแนน) โดยผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เลือกว่าสามารถดำเนินการได้มากคิดเป็นร้อยละ 45.78 รองมาคือ การจัดมุมเครื่องดื่มและอาหารว่างแบบบริการตัวเอง การจัดบริการอาหารจานเดียวหรือแบบบุฟเฟต์ตามความเหมาะสมของจำนวนผู้เข้าร่วมประชุม และการใช้ภาชนะที่คงทนถาวรหรือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ตามลำดับ โดยจากการสัมภาษณ์เชิงลึก พบว่า การจัดเตรียมอาหารและเครื่องดื่มดังกล่าวถูกจำกัดด้วยงบประมาณ หรือปัจจัยอื่นๆ ร่วมด้วย นอกจากนี้ผู้จัดประชุมยังพบปัญหาความไม่สดใหม่ของอาหารว่าง เนื่องจากเวลาที่จัดวางอาหารว่างเกิดขึ้นก่อนการประชุมเป็นระยะเวลานาน และไม่มีบรรจุภัณฑ์ปิดครอบ จึงมีความจำเป็นในการหาวิธีในการจัดเตรียมอาหาร ที่ยังคงความสดใหม่ของอาหารอยู่เสมอ

ส่วนที่ 5 การจัดเตรียมอื่นๆ พบว่า การปิดเครื่องฉาย LCD หรือเลือกเป็น stand-by mode มีคะแนนสูงสุด กล่าวคือ 4.27 คะแนน (คะแนนเต็ม 5 คะแนน) โดยผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เลือกว่าสามารถดำเนินการได้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 46.34 รองมาคือ การเตรียมภาชนะเพื่อรองรับเอกสารการประชุมที่ไม่ใช้แล้ว เพื่อนำไปใช้เป็นกระดาษรีไซเคิล และการเลือกใช้รางวัลหรือของที่ระลึกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตามลำดับ จากการสัมภาษณ์เชิงลึก พบว่า การเลือกใช้รางวัลหรือของที่ระลึกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนั้น มีอุปสรรคในเรื่องของราคาสินค้าที่อาจแพงกว่าราคาสินค้าทั่วไป และแหล่งซื้อสินค้า

จากการสำรวจทั้ง 5 ขั้นตอนของการดำเนินการจัดประชุมสีเขียว แสดงให้เห็นว่า การดำเนินการจัดประชุมสีเขียวจำเป็นต้องได้รับความร่วมมือจากทุกคนที่เกี่ยวข้อง ต้องมีการวางแผนการดำเนินการอย่างเป็นระบบ หาแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสมของแต่ละหน่วยงาน มีการเตรียมความพร้อมทั้งในด้านงบประมาณและอุปกรณ์สนับสนุนต่างๆ ตลอดจนการสร้างความรู้ความเข้าใจในการดำเนินการ เพื่อให้เกิดการปฏิบัติที่ถูกต้อง

ผลการประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์

การประเมินก๊าซเรือนกระจกและเปรียบเทียบผลการดำเนินการของทั้ง 3 กรณีศึกษา โดยพิจารณาจากกิจกรรมหลักสำหรับการประชุมสีเขียว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

Table 2 The greenhouse emissions of green meeting.

List	Case study 1	Case study 2	Case study 3
Resource and energy use			
Electricity (kgCO_2eq)	9.96	16.28	445.02
Paper (kgCO_2eq)	0.095	0.35	0
Plastic (kgCO_2eq)	2.02	1.85	0
Paper boxes (kgCO_2eq)	0.63	0	0
Waste management			
Paper / Paper boxes (kgCO_2eq)	1.39		
Plastic (kgCO_2eq)	0.56	1.63	0
Food waste (kgCO_2eq)	0	0.31	5.06
Total GHG emissions	14.66	20.42	450.08
Number of attendees	40	37	70
GHG emissions per person	0.37	0.55	6.43

ผลการประเมินก๊าซเรือนกระจกของทั้ง 3 กรณีศึกษา พบว่า การใช้ไฟฟ้า มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด ส่วนกิจกรรมอื่นๆ เช่น การใช้กระดาษหรือพลาสติก การเกิดของเสีย เป็นต้น ขึ้นอยู่กับการดำเนินการของแต่ละหน่วยงาน ดังนี้

กรณีศึกษาที่ 1 พบว่า การใช้ไฟฟ้า มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 67.94 รองมาคือ การใช้พลาสติก การฝังกลบกระดาษ การใช้กล่องกระดาษ การฝังกลบพลาสติก และการใช้กระดาษ คิดเป็นร้อยละ 13.78, 9.48, 4.30, 3.82 และ 0.65 ตามลำดับ

กรณีศึกษาที่ 2 พบว่า การใช้ไฟฟ้า มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 79.73 รองมาคือ การใช้พลาสติก การฝังกลบพลาสติก การใช้กระดาษ และการฝังกลบเศษอาหาร คิดเป็นร้อยละ 9.06, 7.98, 1.71 และ 1.52 ตามลำดับ

กรณีศึกษาที่ 3 พบว่า การใช้ไฟฟ้า มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 98.88 รองมาคือ การฝังกลบเศษอาหาร คิดเป็นร้อยละ 1.12 ส่วนกิจกรรมอื่นๆ ไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากไม่มีการจัดพิมพ์เอกสาร มีการจัดอาหารและเครื่องดื่มแบบบริการตนเอง ทำให้ผู้เข้าร่วมประชุมตักอาหารอย่างพอเหมาะไม่เหลือเป็นของเสีย และมีการใช้ภาชนะที่คงทนถาวร นอกจากนี้องค์กรยังมีนโยบาย และแนวทางปฏิบัติด้านสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน จึงส่งผลให้การดำเนินการเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าการใช้ไฟฟ้าจะมีค่าการ

ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด เมื่อเทียบกับทั้ง 3 กรณีศึกษา ซึ่งสาเหตุเกิดจากการประชุมใช้ระยะเวลานานมากกว่ากรณีศึกษาอื่นๆ ประกอบกับเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น หลอดไฟ เป็นต้น ยังเป็นรุ่นเก่าที่มีการใช้พลังงานสูง แต่เนื่องจากหน่วยงานมีงบประมาณจำกัด จึงทำให้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ทันที หากสามารถปรับเปลี่ยนได้จะช่วยลดการใช้ไฟฟ้าได้ถึงร้อยละ 20.75

การประเมินผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์จากการดำเนินการนั้น พบว่ากิจกรรมที่สามารถลดค่าใช้จ่ายได้โดยตรง คือ การใช้กระดาษ และหากวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการดำเนินการตามแนวทางการประชุมสีเขียว ยังเกิดผลประโยชน์อื่นๆ เช่น มูลค่าขยะที่สามารถแยกได้ และการประหยัดต้นทุนในการคัดแยกและการกำจัดของเสียที่ปลายทาง โดยผลการประเมินก๊าซเรือนกระจกและค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการใช้กระดาษและการกำจัดกระดาษหลังการใช้งาน โดยเปรียบเทียบระหว่างการประชุมทั่วไป และการจัดประชุมสีเขียว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

Table 3 Comparison of paper use and waste paper during the normal meeting and green meetings.

List	Normal case 1	Case study 1	Normal case 1	Case study 2	Normal case 3	Case study 3
Paper (kgCO_2eq)	21.30	0.095	13.66	0.35	6.63	0
Waste paper (kgCO_2eq)	32.89		21.10		10.03	
Reduced GHG emissions (kgCO_2eq)	54.10		34.41		16.66	
Reduced cost per meeting (baht)	472.50		303.03		147.00	

จากกรณีศึกษาดังกล่าว นำไปสู่ทางเลือกและแนวทางปฏิบัติเพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมและการลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการจัดประชุมสีเขียว ทั้งในด้านการใช้ไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น หลอดไฟส่องสว่าง เครื่องปรับอากาศ เครื่องคอมพิวเตอร์ และ เครื่อง LCD เป็นต้น และการใช้ทรัพยากรต่างๆ รวมถึงการเกิดของเสียหลังจากการประชุม โดยสามารถกำหนดแนวทางได้ 4 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 ด้านนโยบาย โดยองค์กรควรมีการกำหนดนโยบาย และเป้าหมายที่ชัดเจน เพื่อกระตุ้นให้เกิดการปฏิบัติตามและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

ระดับที่ 2 แนวทางที่สามารถทำได้ทันที ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การปรับเปลี่ยนพฤติกรรม เช่น การกำหนดแนวทางปฏิบัติต่างๆ เป็นต้น ตัวอย่างการปรับตั้งอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศที่ 25-26 องศาเซลเซียส โดยจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทุกๆ 2 องศาเซลเซียส จะช่วยประหยัดไฟฟ้า 1.32 kWh (tnews, 2019)

ระดับที่ 3 แนวทางที่ใช้เวลาในระยะสั้น ซึ่งมุ่งเน้นการสร้างความรู้ความเข้าใจ การสร้างความตระหนัก เช่น การจัดประชุมหรืออบรมภายในองค์กร ครอบคลุมผู้ปฏิบัติงานในทุกระดับ หรือการมีผู้นำซึ่งเป็นตัวอย่างในการดำเนินการ เป็นต้น

ระดับที่ 4 แนวทางที่ใช้เวลาในระยะยาว ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนในระดับโครงสร้าง เช่น การออกแบบอาคารโดยใช้ผนังกระจกรอบอาคารที่สามารถใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติได้ เพื่อช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่างลง การวางระบบปรับอากาศแบบปรับปริมาณลมจ่าย เพื่อช่วยลดการใช้พลังงานมอเตอร์พัดลมของเครื่องส่งลมเย็น หรือการเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ประหยัดพลังงาน ตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ 3 มีการใช้หลอดไฟส่องสว่างแบบหลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 (36 วัตต์) หากเปลี่ยนเป็น หลอดฟลูออเรสเซนต์ T5 (28 วัตต์) จะสามารถลดการใช้พลังงานได้ ร้อยละ 22 ของการจัดประชุมแต่ละครั้ง

นอกจากแนวทางที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว การจัดการและวางแผนการดำเนินการยังถือเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการดำเนินการในทุกขั้นตอน ซึ่งหากมีการวางแผนที่ดี มีแนวทางปฏิบัติที่ชัดเจน และมีการกำหนดผู้รับผิดชอบหลัก จะส่งผลให้การดำเนินการเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการดำเนินการเพื่อช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม ลดค่าใช้จ่าย รวมถึงการจัดการด้านงบประมาณ ซึ่งเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการดำเนินการ เพื่อให้การดำเนินการเป็นไปอย่างรวดเร็วและทันต่อการเปลี่ยนแปลง

สรุป

การจัดประชุมสีเขียว เป็นแนวทางการดำเนินการที่ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ซึ่งจำเป็นต้องมีแนวทางการปฏิบัติที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการนำไปใช้อย่างแท้จริง การวางแผนและการกำหนดแนวทางปฏิบัติที่ชัดเจนในทุกขั้นตอนจึงเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากแต่ละหน่วยงานอาจมีข้อจำกัดและอุปสรรคในการดำเนินการที่ต่างกัน ทั้งในเรื่องของวัฒนธรรมองค์กร งบประมาณ และรูปแบบการดำเนินการ ดังนั้นแนวทางการปฏิบัติที่เหมาะสมนั้น จึงต้องเกิดจากการร่วมมือกันภายในองค์กร ทั้งการคิดและกำหนดแนวทางของตนเอง เพื่อให้เกิดการประชุมสีเขียวที่ยั่งยืนและเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์เอนเนอร์ยี่คอมเพล็กซ์ สำหรับข้อมูลประกอบการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

นงค์นุช ศรีธนาอนันต์. 2559. **แนวทางปฏิบัติและการส่งเสริมการประชุมสีเขียวในประเทศไทย**. สุทธิปริทัศน์ 30(96).

Dcbsdcon. 2562. **ประโยชน์และความสำคัญของการประชุม** (Online). http://www.dcbsdcon.org, 7 กรกฎาคม 2562.

Thailand Greenhouse Gas Management Organisation (TGO). 2019. **Guideline for PCR of "Meetings and relative activities"** (Online). http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/download/ts_1060ce1f24.pdf, 29 November 2019.

Tnews. 2562. **วิศวกรแนะวิธี เปิดแอร์ให้ประหยัด หมดห่วงเรื่องค่าไฟ เปิดยังไงก็ไม่เปลือง** (Online). https://www.tnews.co.th/variety, 29 พฤศจิกายน 2562.

การลดเสียงดังจากเครื่องปั๊มโลหะเพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

Noise Reduction from Stamping Machine for Safety to the Operator in Automotive Parts Manufacturing Industry

ภาณุวิชญ์ สุภพิชญานันท์[1] เลิศชัย ระตะนะอาพร[2] และกฤษ วงษ์เกษม[2]

Panuwich Supapichayanan[1], Lertchai Ratana-Arporn[2] and Kris Wonggasem[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับเสียงดังที่เกิดจากการทำงานของเครื่องปั๊มโลหะ และหาวิธีการลดระดับเสียงให้อยู่ระดับที่ปลอดภัย โดยจากการตรวจวัดระดับเสียงดังสูงสุดที่เกิดขึ้นจากเครื่องปั๊มโลหะบริเวณถาดการไหลของแผ่นเศษชิ้นงานทั้งหมด 3 จุด โดยจุดแรกคือจุดที่ก่อให้เกิดเสียงดัง จุดที่สองคือจุดผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องปั๊มโลหะ และจุดที่สามคือจุดผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ใกล้เคียง โดยพบว่าก่อนการปรับปรุงระดับเสียงที่จุดแรกเท่ากับ 107.75 เดซิเบลเอ จุดที่สองเท่ากับ 101.92 เดซิเบลเอ และจุดที่สามเท่ากับ 83.30 เดซิเบลเอ ซึ่งเป็นระดับเสียงที่เป็นอันตรายต่อการได้ยินของผู้ปฏิบัติงาน ภายหลังจากการปรับปรุงทั้งหมด 2 วิธีได้พบว่าวิธีที่ 2 การใช้ลูกกลิ้งเหล็กพันด้วยวัสดุกันกระแทกสามารถลดเสียงได้ดีที่สุด โดยสามารถลดระดับเสียงที่จุดแรกลงเหลือ 86.6 เดซิเบลเอ จุดที่สองลดลงเหลือ 80.83 เดซิเบลเอ และจุดที่สามลดลงเหลือ 70.39 เดซิเบลเอ ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถลดเสียงดังทำให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน

ABSTRACT

The objective of this research is to study noise levels measurement from the stamping machine and find the method to reduce noise to safety levels. The researcher measures the noise levels at discharge of products from three different positions: 1) at Stamping machine, 2) at the operator, 3) at the operator who works around stamping machine. Noise levels measured before improvement from three positions is 107.75 dB(A), 101.92 dB(A) and 83.30 dB(A), respectively. Those effect to the operators for unsafe condition. After improvement by 2 methods at was found that the second method (using dampening rollers) is the best method to reduce noise to safety level. That noise levels same three position can be measured as 86.60 dB(A), 80.83 dB(A) and 70.39 dB(A), respectively.

Key Words: Noise reduction, Stamping machine, Automotive Parts Manufacturing

* Corresponding author; e mail address: fengkrw@ku.ac.th

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Graduate Program in Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

เนื่องด้วยสถานประกอบกิจการที่นำมาเป็นกรณีศึกษาในครั้งนี้ เป็นอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ตั้งอยู่ที่จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งได้มีการใช้เครื่องปั๊มโลหะสำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะเป็นหลัก โดยจากการรวบรวมผลการตรวจวัดระดับเสียงสะสม 8 ชั่วโมงการทำงานประจำปี พ.ศ. 2562 พบว่าในแต่ละพื้นที่ที่มีการทำงานกับเครื่องปั๊มโลหะมีระดับเสียงตั้งแต่ 85.3-90.9 เดซิเบลเอ ซึ่งเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่ให้เกิน 85 เดซิเบลเอ (กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน กระทรวงแรงงาน, 2559) อีกทั้งองค์การอนามัยโลกได้นิยามไว้ว่าระดับความดังเสียงที่เกินกว่า 85 เดซิเบลเอที่ทุกความถี่ถือเป็นระดับเสียงที่เป็นอันตรายต่อการได้ยิน (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, ม.ป.ป.) ทั้งนี้เมื่อผู้ปฏิบัติงานต้องทนรับสัมผัสเสียงดังเป็นระยะเวลายาวนานและต่อเนื่องสะสมติดต่อกันเป็นเวลานานหลายปี ซึ่งจะส่งผลให้เกิดโรคจากการทำงานและอันเนื่องมาจากการทำงาน เช่น การเกิดโรคความดันโลหิตที่สูงขึ้น โรคหัวใจ โรคทางการได้ยิน เป็นต้น ซึ่งมักจะไม่สามารถรักษาให้หายกลับเป็นปกติได้ (อัถสิทธ์ รัตนารักษ์, 2560)

การศึกษาครั้งมีแนวความคิดที่จะหาแนวทางการปรับปรุงเพื่อลดเสียงดังจากเครื่องปั๊มโลหะให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานโดยการประยุกต์ใช้วัสดุอุปกรณ์ภายในสถานประกอบกิจการในการปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดเสียงดังจากแหล่งกำเนิดด้วยวิธีการทางวิศวกรรม ทั้งนี้สิ่งที่ดำเนินการปรับปรุงดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานที่จะไม่ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะกระบวนการผลิต เวลาการทำงาน รวมไปถึงคุณภาพของชิ้นงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้แผ่นกันกระแทกอีวีเอโฟม (EVA foam) ขนาด 1 เซนติเมตร แผ่นเหล็กขนาด 2 มิลลิเมตร ลูกกลิ้งเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ยาว 21 เซนติเมตร แผ่นกันกระแทกอีพีอีโฟม (EPE foam) ขนาด 2 มิลลิเมตร และแผ่นพลาสติกใสพีวีซี (PVC Sheet) ขนาด 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ภายในสถานประกอบกิจการที่ทำการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยเครื่องตรวจวัดระดับเสียง ยี่ห้อ CEL240 Type 2 Sound Level Meter มาตรฐาน ANSI S1.4, IEC 60651 และ IEC 61672 โดยใช้เครื่องปรับเทียบความถูกต้องก่อนและหลังการตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือยี่ห้อ Casella Cel CEL-120/2 Sound Level Calibrator ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดเสียง 114 เดซิเบล ที่ความถี่ 1,000 เฮิร์ท พบว่าเครื่องวัดเสียงดังกล่าวสามารถตรวจวัดระดับเสียงก่อนและหลังทำการทดลองได้ที่ 114 เดซิเบล และตลับเมตรสำหรับวัดระยะห่างในหน่วยเซนติเมตร

เครื่องปั๊มโลหะที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องปั๊มโลหะขนาด 300 ตัน มีโครงสร้างเป็นรูปตัวโอ (O-Frame) ซึ่งใช้แม่พิมพ์ประเภทตัดเฉือนตัดแยกส่วนของแผ่นโลหะออกจากกัน ขนาดรวมระหว่างพันช์และดายประกบกัน กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 60x63x43.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร (Figure 1) โดยมีการใช้วัตถุดิบเป็นแผ่นเหล็กชนิดม้วนความหนา 0.2 เซนติเมตร กว้าง 31.9 เซนติเมตร ซึ่งได้ผลผลิตคือแผ่นชิ้นงานหนา 0.2 เซนติเมตร เส้นรอบชิ้นงาน 98 เซนติเมตร น้ำหนัก 650 กรัม แล้วแผ่นชิ้นงานไหลตกลงมายังถาดการไหลของแผ่นเศษชิ้นงานที่เป็นโลหะหนา 0.2 เซนติเมตร ขนาดกว้างxยาว เท่ากับ 34x62 ตารางเซนติเมตร และได้เกิดแผ่นเศษเหล็กหนา 0.2 เซนติเมตร เส้นรอบรูป 145 เซนติเมตร น้ำหนัก 450 กรัม ซึ่งไหลผ่านถาดรองแผ่นเศษเหล็กหนา 0.2 เซนติเมตร กว้าง 36 เซนติเมตร ยาว 143 เซนติเมตร ตกลงไปสู่ถังรวบรวมเศษเหล็กขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 80x150x75 ลูกบาศก์เซนติเมตร ฐานสูงจากพื้น 7 เซนติเมตร (Figure 2)

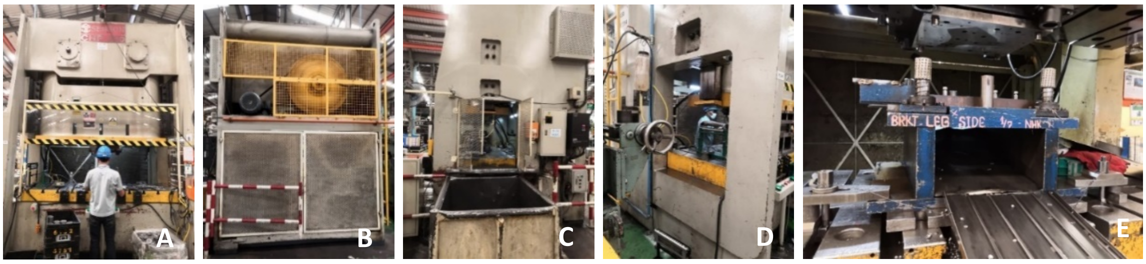


Figure 1 Stamping machine, Weight rating 300 tons, Front view (A), Back view (B), Right view (C), Left view (D), Blank Die (E).

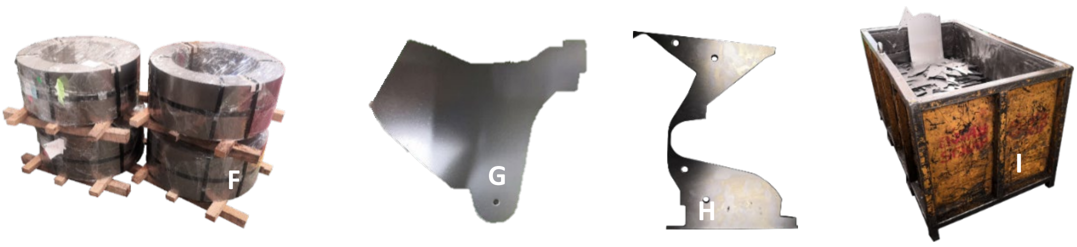


Figure 2 Metal sheet coils (F), Product (G), Scrap (H), Scrap bin container (I).

วิธีการตรวจวัดระดับเสียงดังที่เกิดขึ้นจากเครื่องปั๊มโลหะ

การตรวจวัดระดับเสียงดังเพื่อนำค่าที่ได้มาทำการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง และเปรียบเทียบกับระดับเสียงที่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจะทำการบันทึกค่าระดับเสียงสูงสุดในหน่วยเดซิเบลเอที่อ่านได้จากเครื่องตรวจวัดระดับเสียงดังที่บันทึกค่าระดับเสียงที่เกิดขึ้นในขณะที่แผ่นชิ้นงานตกกระทบกับถาด 1 ครั้ง ทำซ้ำจำนวน 10 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะตรวจวัดทั้งหมด 3 จุด เพื่อให้ทราบถึงระดับเสียงที่เกิดขึ้นจากเครื่องปั๊มโลหะบริเวณถาดการไหลของแผ่นเศษชิ้นงาน การรับสัมผัสระดับเสียงดังของผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องปั๊มโลหะ และผู้ที่ปฏิบัติงานที่อยู่ใกล้เคียง โดยจุดแรกเป็นจุดที่ก่อให้เกิดเสียงดัง ซึ่งจะตั้งเครื่องมือตรวจวัด

ระดับเสียงดังสูงจากพื้น 150 เซนติเมตร และไมโครโฟนห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง 30 เซนติเมตร จุดที่สองเป็นจุดการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องปั๊มโลหะ ซึ่งจะตั้งเครื่องมือตรวจวัดระดับเสียงดังสูงจากพื้น 160 เซนติเมตร และไมโครโฟนห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง 70 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความสูงเท่ากับใบหูและระยะห่างเท่ากับจุดที่ผู้ปฏิบัติงานประจำ จุดที่สามเป็นจุดผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ใกล้เคียงที่รับสัมผัสเสียงดัง ซึ่งจะตั้งเครื่องมือตรวจวัดระดับเสียงดังสูงจากพื้น 160 เซนติเมตร และไมโครโฟนห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง 700 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความสูงเท่ากับใบหูและระยะห่างเท่ากับจุดที่ผู้ปฏิบัติงานใกล้เคียง

วิธีการหาวัสดุในการลดเสียงดังจากเครื่องปั๊มโลหะ

รวบรวมข้อมูลแล้วทำการวิเคราะห์จุดที่ก่อให้เกิดเสียงดังจากเครื่องปั๊มโลหะบริเวณถาดการไหลของแผ่นเศษชิ้นงาน แล้วจัดหาวัสดุที่มีอยู่ภายในสถานประกอบกิจการที่เหมาะสมกับการลดเสียงดังนำมาออกแบบเพื่อลดระดับเสียงดังให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยบนพื้นฐานแนวคิดที่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะกระบวนการผลิต เวลาการทำงาน รวมไปถึงคุณภาพของชิ้นงาน แล้วจัดทำเป็นอุปกรณ์นำไปติดตั้งแทนที่อุปกรณ์เดิมที่ก่อให้เกิดเสียงดัง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของระดับเสียงดังที่เกิดขึ้นจากจากเครื่องปั๊มโลหะก่อนการปรับปรุง

จากการตรวจวัดเสียงระดับเสียงสูงสุดเฉลี่ยที่เกิดจากบริเวณการกระทบกระแทกระหว่างแผ่นชิ้นงานกับถาดการไหลของแผ่นเศษชิ้นงาน พบว่าที่จุดก่อให้เกิดเสียงดังระยะจากแหล่งกำเนิดเสียง 30 เซนติเมตร มีระดับเสียงเฉลี่ยอยู่ที่ 107.75 เดซิเบลเอ จุดการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องปั๊มโลหะระยะจากแหล่งกำเนิดเสียง 70 เซนติเมตร มีระดับเสียงเฉลี่ยอยู่ที่ 101.92 เดซิเบลเอ และจุดผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ใกล้เคียงที่รับสัมผัสเสียงดังระยะจากแหล่งกำเนิดเสียง 700 เซนติเมตร มีระดับเสียงเฉลี่ยอยู่ที่ 83.30 เดซิเบลเอ ซึ่งพบว่าที่จุดก่อให้เกิดเสียงดังและจุดการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องปั๊มโลหะมีระดับเสียงที่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน (Table 1)

Table 1 Noise measurement results before improvement.

No.	Noise Measurement results (Decibel A)		
	30 centimeters	70 centimeters	700 centimeters
1	106.0	101.4	84.6
2	105.2	99.7	83.1
3	109.5	103.4	82.5
4	106.4	104.0	84.3
5	106.5	103.2	82.3
6	109.0	104.3	84.8

No.	Noise Measurement results (Decibel A)		
	30 centimeters	70 centimeters	700 centimeters
7	109.7	100.1	83.2
8	105.9	102.1	82.0
9	110.0	101.3	81.9
10	109.3	99.7	84.3
Average	107.75	101.92	83.30
Unsafe noise levels		> 85	

ผลของการหาวัสดุในการลดเสียงดังจากเครื่องปั๊มโลหะ

จากการรวมรวมข้อมูลแล้วทำการวิเคราะห์จุดที่ก่อให้เกิดเสียงดังจากจุดถาดการไหลของแผ่นชิ้นงาน พบว่าการเกิดเสียงดังมาจาก 3 สาเหตุ คือ 1. การตกกระทบกระแทกระหว่างแผ่นชิ้นงานกับถาดการไหลของแผ่นชิ้นงานจึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเกิดเสียงดัง 2. การเสียดสีกันขณะการไหลระหว่างแผ่นชิ้นงานกับถาดการไหลของแผ่นชิ้นงาน 3. จุดยึดระหว่างถาดการไหลของแผ่นชิ้นงานกับแม่พิมพ์ชำรุดทำให้ยึดเกาะไม่แน่นเมื่อแผ่นชิ้นงานกระแทกถาดการไหลของแผ่นทำให้เกิดการสันสะเทือนมากขึ้น (Figure 3) โดยสำหรับการปรับปรุงโดยวิธีที่ 1 การปรับปรุงด้วยการใช้แผ่นกันกระแทกอีวีเอโฟม (EVA foam) ขนาด 1 เซนติเมตร ยึดด้วยกาวกับแผ่นเหล็กขนาด 2 มิลลิเมตร ที่ฝั่งด้านตรงข้ามกับแผ่นชิ้นงานตกกระทบ และทำจุดยึดให้มีความมั่นคงแข็งแรง (Figure 4) และวิธีที่ 2 การปรับปรุงด้วยการใช้ลูกกลิ้งเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.54 เซนติเมตร พันด้วยแผ่นกันกระแทกอีพีอีโฟม (EPE foam) ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถรับแรงตกกระทบกระแทกได้ดี แต่สามารถฉีกขาดได้ง่าย ซึ่งพันจนได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกใสพีวีซี (PVC Sheet) เพื่อป้องกันการฉีกขาดซึ่งได้เส้นผ่าศูนย์กลางรวมเป็น 5.4 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถพันได้โดยที่ลูกกลิ้งลูกแรกสามารถหมุนได้โดยไม่ติดกับฐานรอง และเป็นขนาดที่เมื่อแผ่นชิ้นงานตกกระทบแล้วจะไม่กระแทกกับลูกกลิ้งเหล็ก (Figure 4) แล้วนำอุปกรณ์ทั้งสองไปติดตั้งแทนที่อุปกรณ์ก่อนการปรับปรุง เพื่อเปรียบเทียบระดับเสียงที่เกิดขึ้น (Figure 5)

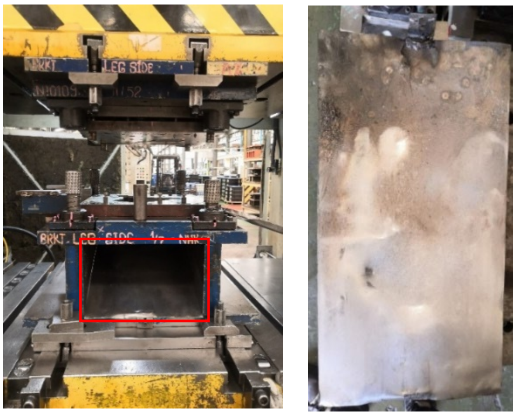


Figure 3 Discharge unit for products before improvement.

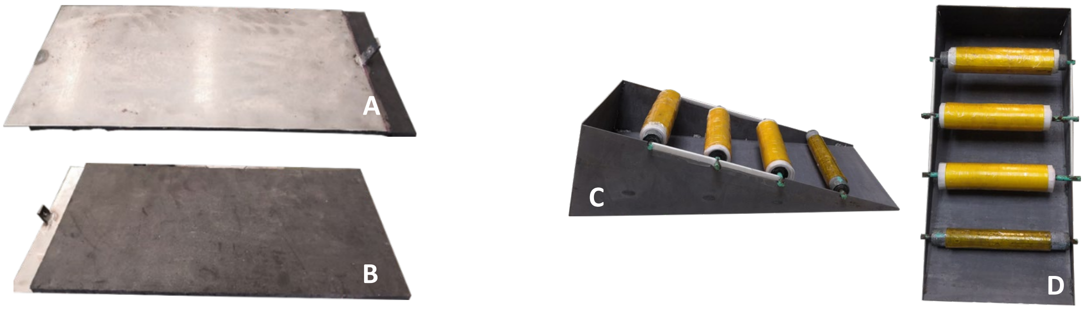


Figure 4 Discharge of products after improvement, using EVA Foam, Above (A), Below (B), using dampening rollers, Side view (C), Top view (D).

Figure 5 Discharge of products before and after improvement, Before improvement (A), After improvement by using EVA Foam (B), After improvement by using dampening rollers (C).

ผลของระดับเสียงดังที่เกิดขึ้นจากเครื่องปั๊มโลหะหลังการปรับปรุง

จากการทดลองพบว่าวิธีที่ 2 การใช้ลูกกลิ้งเหล็กพันด้วยวัสดุกันกระแทกสามารถลดเสียงได้ดีที่สุดโดยพบว่าที่จุดก่อให้เกิดเสียงดังระยะจากแหล่งกำเนิดเสียง 30 เซนติเมตร มีระดับเสียงเฉลี่ยอยู่ที่ 86.60 เดซิเบลเอ จุดการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องปั๊มโลหะระยะจากแหล่งกำเนิดเสียง 70 เซนติเมตร มีระดับเสียงเฉลี่ยอยู่ที่ 80.83 เดซิเบลเอ และจุดผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ใกล้เคียงที่รับสัมผัสเสียงดังระยะจากแหล่งกำเนิดเสียง 700 เซนติเมตร มีระดับเสียงเฉลี่ยอยู่ที่ 70.39 เดซิเบลเอ ซึ่งสามารถลดเสียงดังที่จุดการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องปั๊มโลหะให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย (Table 2)

Table 2 Noise measurement results after improvement by using dampening rollers.

No.	Noise Measurement results (Decibel A)		
	30 centimeters	70 centimeters	700 centimeters
1	87.0	84.1	71.1
2	89.1	83.0	71.0
3	86.9	81.0	69.6
4	86.5	79.7	71.0
5	84.0	79.2	70.0

No.	Noise Measurement results (Decibel A)		
	30 centimeters	70 centimeters	700 centimeters
6	85.6	83.3	71.0
7	88.0	78.5	70.0
8	89.5	78.6	70.1
9	84.3	82.8	71.1
10	85.1	78.1	69.0
Average	86.60	80.83	70.39
Unsafe noise levels		> 85	

ผลของการเปรียบเทียบระดับเสียงดังที่เกิดขึ้นจากเครื่องปั๊มโลหะก่อนและหลังการปรับปรุง

การเปรียบเทียบระดับเสียงสูงสุดเฉลี่ยที่เกิดจากบริเวณถาดการไหลของแผ่นเศษชิ้นงานก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงด้วยวิธีที่ 2 การใช้ลูกกลิ้งเหล็กพันด้วยวัสดุกันกระแทกพบว่าสามารถลดระดับเสียงที่จุดก่อให้เกิดเสียงดังระยะจากแหล่งกำเนิดเสียง 30 เซนติเมตร ลดได้ 21.15 เดซิเบลเอ หรือลดลง 19.63 เปอร์เซ็นต์ จุดการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องปั๊มโลหะระยะจากแหล่งกำเนิดเสียง 70 เซนติเมตร ลดได้ 21.09 เดซิเบลเอ หรือลดลง 20.69 เปอร์เซ็นต์ และจุดผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ใกล้เคียงที่รับสัมผัสเสียงดังระยะจากแหล่งกำเนิดเสียง 700 เซนติเมตร ลดได้ 12.91 เดซิเบลเอ หรือลดลง 15.50 เปอร์เซ็นต์ (Figure 6)

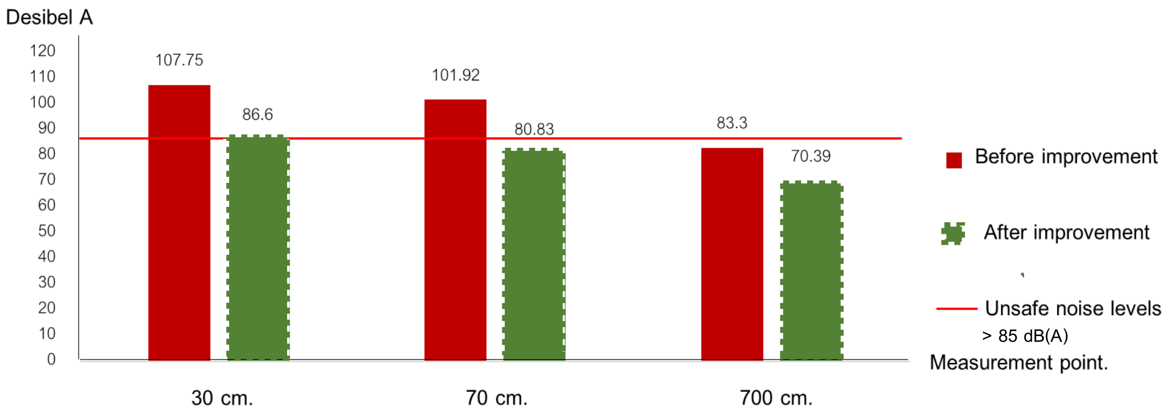


Figure 6 The comparison of noise measurement results between before and after improvement.

สรุป

ระดับเสียงสูงสุดเฉลี่ยที่เกิดจากการทำงานของเครื่องปั๊มโลหะบริเวณถาดการไหลของแผ่นเศษชิ้นงานก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงด้วยวิธีที่ 2 การใช้ลูกกลิ้งเหล็กพันด้วยวัสดุกันกระแทก โดยที่จุดก่อให้เกิดเสียงดังมีระดับเสียงก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 107.75 เดซิเบลเอ และหลังการปรับปรุงอยู่ที่ 86.60 เดซิเบลเอ สามารถลดระดับเสียงได้ 21.15 เดซิเบลเอ หรือลดลง 19.63 เปอร์เซ็นต์ ที่จุดการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงาน

ประจำเครื่องปั๊มโลหะก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 101.92 เดซิเบลเอ และหลังการปรับปรุงอยู่ที่ 80.83 เดซิเบลเอ สามารถลดระดับเสียงได้ 21.09 เดซิเบลเอ หรือลดลง 20.69 เปอร์เซ็นต์ และที่จุดผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ใกล้เคียงที่รับสัมผัสเสียงดังก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 83.30 เดซิเบลเอ และหลังการปรับปรุงอยู่ที่ 70.39 เดซิเบลเอสามารถลดระดับเสียงได้ 12.91 เดซิเบลเอ หรือลดลง 15.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถระดับเสียงที่จุดการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องปั๊มโลหะให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. ม.ป.ป. **คลังความรู้ เสียงและความสั่นสะเทือน : อันตรายที่เกิดจากเสียง** (Online). https://bit.ly/2OkrG2U

กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน กระทรวงแรงงาน. 2559. **กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหารจัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559.**

อัถสิทธ์ รัตนารักษ์. 2550. สถานการณ์การสูญเสียการได้ยินจากการสัมผัสเสียงดังในการประกอบอาชีพของประเทศไทยและต่างประเทศ. **วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.** 10(1).

พฤติกรรมการบดอัดและกำลังอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์

Compaction Characteristics and Uniaxial Compressive Strength of Low-quality Crushed Rocks Mixed with Sugar Cane Ash and Cement

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข[1*] สุนิต ประเวระทัง[1] สิรวิชญ์ สีหา[1] ธนนนท์ ฉายาพงศ์[1] พรเทพ แข็งขัน[1] และ กฤต อินทรกุล[1]

Thaweesak Pitikhunpongsuk[1*], Sunit Prawerathang[1], Sirawit Seeha[1], Tananon Chayapong[1], Pornthep Khaengkhun[1] and Krit Intarakul[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ ศึกษาการนำหินปลายตะแกรงซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมโม่หิน ผสมกับเถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ที่ส่วนผสมระหว่างหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อย (R/A) เท่ากับ 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยผสมกับซีเมนต์คงที่ เท่ากับ 4% โดยน้ำหนักแห้ง เพื่อใช้เป็นสารเชื่อมประสานในการบดอัดเตรียมตัวอย่างโดยวิธี Modified Compaction โดยใช้ความชื้นที่เหมาะสม เท่ากับ 12% เพื่อการเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ ผลการทดสอบพบว่า ทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยที่ส่วนผสม 90/10 มีค่ากำลังอัดดีที่สุด คือ 34 ksc และ 58 ksc ที่อายุการบ่ม 7 วันและ 14 วัน ตามลำดับ กำลังอัดที่ส่วนผสมอื่น คือ 80/20, 70/30 และ 60/40 มีกำลังต่ำกว่า กำลังอัดที่ส่วนผสม 90/10 อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อย (R/A) ที่ส่วนผสม 80/20, 70/30 และ 60/40 ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง สำหรับใช้ในงานวัสดุชั้นรองพื้นทางและวัสดุชั้นพื้นทาง

ABSTRACT

This research study investigated the potential use of low-quality crushed rock (which is by-products from rock crushing plant) mixed with sugar cane ash (which is by-products from sugar industry) at the ratios of R/A for 90/10, 80/20, 70/30 and 60/40 with the addition of cement content at 4% by dry weight. Optimum moisture content (OMC) at 12% was used to prepare specimens by modified compaction. Based on unconfined compressive strength (q_u), test results showed that the specimen ratio at 90/10 was the best mixing ratio with the q_u values of 34 ksc and 58 ksc at the curing time of 7 days and 14 days respectively. Other R/A mixing ratios of 80/20, 70/30 and 60/40 showed lower strength values compared to that of 90/10. However, the strength values at these R/A mixing ratios (80/20, 70/30 and 60/40) showed the potential use as materials for subbase course and base course for roads according to the standard of Department of Highway.

Key words: Sugar cane ash, pozzolanic materials, soil Improvement, modified compaction, soil cement

* Corresponding author; e-mail address: fengtwj@ku.ac.th

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปัจจุบันการก่อสร้างถนนเพิ่มมากขึ้นตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ จึงทำให้มีความต้องการใช้วัสดุสำหรับงานก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น ถนนหนทาง (Roads) เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญอย่างยิ่งของประเทศในการนำพาความเจริญทางเศรษฐกิจและความสะดวกสบายจากในเมืองไปยังชนบท และการขนส่งจากชนบทมาสู่ในเมือง กล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า ถนนถือได้ว่าเป็นสิ่งก่อสร้างสำคัญในการเดินทางและการขนส่ง ดังนั้น วัสดุที่นำมาใช้ในงานก่สอร้างถนนจึงมีความสำคัญมาก วัสดุที่ขาดคุณภาพส่งผลให้ถนนพังเร็วกว่าเวลาอันควร ชั้นทางในหลักของวิศวกรรมการทางในงานก่อสร้างถนนแบ่งออกเป็น 3 ชั้นหลัก ได้แก่ ชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นผิวทาง ในการออกแบบชั้นทาง ผู้ออกแบบจะคัดเลือกวัสดุเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทาง ส่วนมากจะเป็นวัสดุจำพวก หินคลุก ดินลูกรัง และหินฝุ่น เป็นต้น (กรมทางหลวง, 2532; กรมทางหลวง, 2556; ทวีศักดิ์, 2556; ทวีศักดิ์และสุนิต, 2563)

อย่างไรก็ตาม วัสดุก่อสร้างเหล่านี้นับวันยิ่งหาได้ยากและราคาสูงขึ้น ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้ นำเสนอแนวทางการปรับปรุงคุณภาพหินปลายตะแกรงและเถ้าชานอ้อย จัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมโม่หินและอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งทั้ง 2 ประเภทมาผสมซีเมนต์ เพื่อเป็นปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น เพื่อเสนอเป็นแนวทางการใช้เป็นวัสดุทดแทนสำหรับงานก่อสร้างทาง (ชัย, 2555; ทวีศักดิ์, 2556; จิรวัฒน์, 2560; สุวิมล, 2546)

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพหินปลายตะแกรงและเถ้าชานอ้อย ได้แก่ Sampling moisture content, Liquid limit, Plastic limit, Plasticity index, Grain Size Analysis, Fine content (soil passing sieve no.200) และ Specific gravity(G_s) เพื่อนำผลการทดสอบไปใช้ในการจำแนกประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) และระบบ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จากนั้น ทำการศึกษาพฤติกรรมการบดอัดแบบ Modified Compaction ของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อย ที่อัตราส่วนผสมระหว่าง หินปลายตะแกรงต่อเถ้าชานอ้อย (R/A) เท่ากับ 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density หรือ MDD) และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัด (Optimum Moisture Content หรือ %OMC) ค่าเฉลี่ย %OMC ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่าง หินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ แบบดินซีเมนต์บดอัด (Compacted Soil-Cement) เพื่อใช้เป็นวัสดุตัวอย่าง (Specimens) ในการศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ ผลการทดสอบกำลังอัดเป็นผลทดสอบที่นำไปใช้ประเมินการนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมโยธา กล่าวคือ บทความนี้นำเสนอ พฤติกรรมการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ เพื่อศึกษาแนวโน้มการใช้เถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์ ในการแทนที่หินคลุกปลายตะแกรง เพื่อใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างชั้นทางตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณสมบัติทางกายภาพของหินปลายตะแกรงและเถ้าชานอ้อย

หินปลายตะแกรงที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังรูป Figure 1 เป็นวัสดุที่ได้มาจากโรงโม่หินศิลาเจริญกิจ จาก จ.สระบุรี มีลักษณะเป็นทรายสีเทาปนสีดำ รูปร่างเป็นเม็ดเหลี่ยม โดยมีดินเม็ดหยาบและเม็ดละเอียดปนคละกัน Table 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของหินปลายตะแกรง ได้แก่ ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index เท่ากับ 20.60%, 16.92% และ 3.68% ตามลำดับ ผลทดสอบการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน แสดงดังรูป Figure 3 พบว่า หินปลายตะแกรงมีดินเม็ดละเอียด (ดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ปนอยู่ประมาณ 10% จากคุณสมบัติทางกายภาพของหินปลายตะแกรง จำแนกประเภทดินได้เป็น SW-SC ตามระบบ USCS และจัดเป็นดินกลุ่ม A-2-4 ตามระบบ AASHTO กล่าวคือ หินปลายตะแกรงจัดเป็นทรายที่มีขนาดคละดีและมีดินเหนียวผสมอยู่ (Well-graded sand with clay) งานวิจัยครั้งนี้ เลือกใช้หินปลายตะแกรงที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับงานทดสอบทางวิศวกรรม

เถ้าชานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังรูป Figure 2 เป็นวัสดุที่ได้มาจากโรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น จาก จ.ขอนแก่น มีลักษณะเป็นผงดินคล้ายแป้งสีดำ คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าชานอ้อย ดังตาราง Table 1 พบว่า เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียว (Non-plastic materials หรือ NP) ผลทดสอบการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน แสดงดังรูป Figure 3 พบว่า เถ้าชานอ้อยมีดินเม็ดละเอียด (ดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ปนอยู่ประมาณ 48.5% จากคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าชานอ้อยจำแนกประเภทดินได้เป็น ทรายปนทรายแป้ง หรือ Silty Sand (SM) ตามระบบ USCS โดยเถ้าชานอ้อยจัดอยู่ในกลุ่ม A4 ตามระบบ AASHTO เมื่อทดลองนำหินปลายตะแกรงมาผสมกับเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ ดังรูป Figure 4 พบว่า เถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์มีการรวมตัวเป็นก้อน (Clod-like materials) ผสมเข้ากับหินปลายตะแกรงมีแนวโน้มทำให้การบดอัดทำได้ง่ายขึ้น

Figure 1 Low-quality crushed rocks used in this study from Saraburi Province.

Figure 2 Sugar cane ash used in this study from Khon Kaen Province.

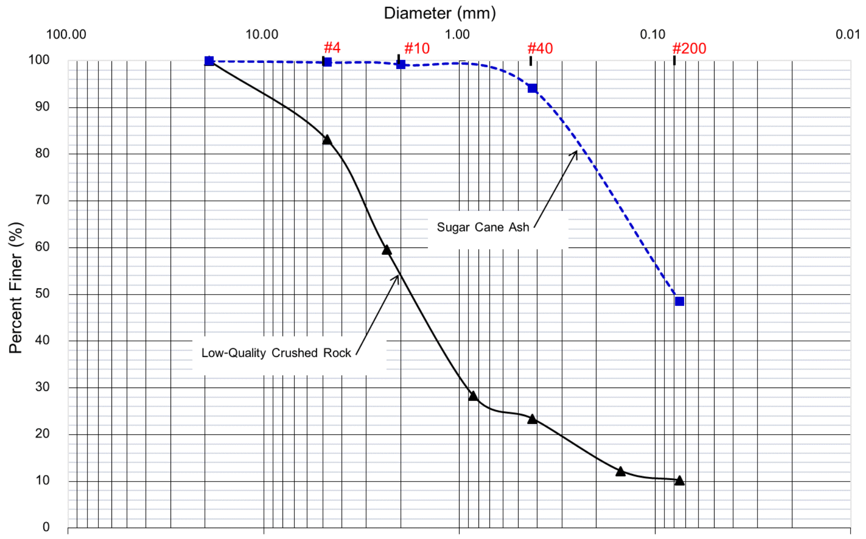


Figure 3 Gradation curves of materials (low-quality crushed rocks and sugar cane ash) in this study.

Table 1 Physical properties of Low-quality crushed rocks and Sugar cane ash used in this study.

Physical Properties	Low-quality crushed rocks	Sugar cane ash
Sampling moisture content (%)	2.1-3.5	9.3
Atterberg's soil content (Soil passed sieve no.40) (%)	23.42	95.14
Liquid limit (LL) (%)	20.60	NP*
Plastic limit (PL) (%)	16.92	NP*
Plasticity index (PI) (%)	3.68	NP*
Fine content (Soil passed sieve no.200) (%)	10.23	48.5
Specific gravity (G_s)	2.65	2.15
Soil classification by USCS	SW-SC	SM
Soil classification by AASHTO	A-2-4	A4

*NP หมายถึง วัสดุไม่มีความเหนียว (Non-plastic materials)

พฤติกรรมการบดอัดหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์

พฤติกรรมการบดอัดแบบ modified compaction ของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยที่ส่วนผสมต่างๆ แสดงดังรูป Figure 5 พบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัด (%OMC) มีค่าอยู่ในระหว่าง 9% ถึง 14.5% โดยความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อย มีค่าระหว่าง 1,890 kg/m^3 ถึง 1,910 kg/m^3 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1,900 kg/m^3 และมีค่าเฉลี่ย %OMC เท่ากับ 12.1% ดังสรุปไว้ใน Table 2 ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้ใช้ปริมาณความชื้น 12% ในการบดอัดเตรียมตัวอย่างสำหรับงานทดสอบทางวิศวกรรม

จากรูป Figure 5 แสดงพฤติกรรมการบดอัดของของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อย (R/A) ที่อัตราส่วนผสม 90/10, 80/20. 70/30 และ 60/40 พบว่า เมื่อส่วนผสมเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น ทำให้ %OMC ที่ใช้ในการบดอัดสูงขึ้นและความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก เถ้าชานอ้อยมีคุณสมบัติคล้ายทรายแป้ง (SM) ที่ไม่มีความเหนียว (Non-plastic materials หรือ NP) และไม่ดูดซับน้ำระหว่างการบดอัด ทำให้มีการบดอัดยากขึ้นเมื่อมีส่วนผสมเถ้าชานอ้อยมากขึ้น เพราะว่า อนุภาคเถ้าชานอ้อยไม่ดูดซับน้ำและมีน้ำเยิ้มและเม็ดดินลอยกระจาย กล่าวคือ มีลักษณะการ Bleeding ระหว่างอนุภาคเถ้าชานอ้อยกับน้ำในระหว่างการบดอัด

Figure 4 Low-quality crushed rocks mixed with sugar cane ash and cement becoming compactable clod-like materials.

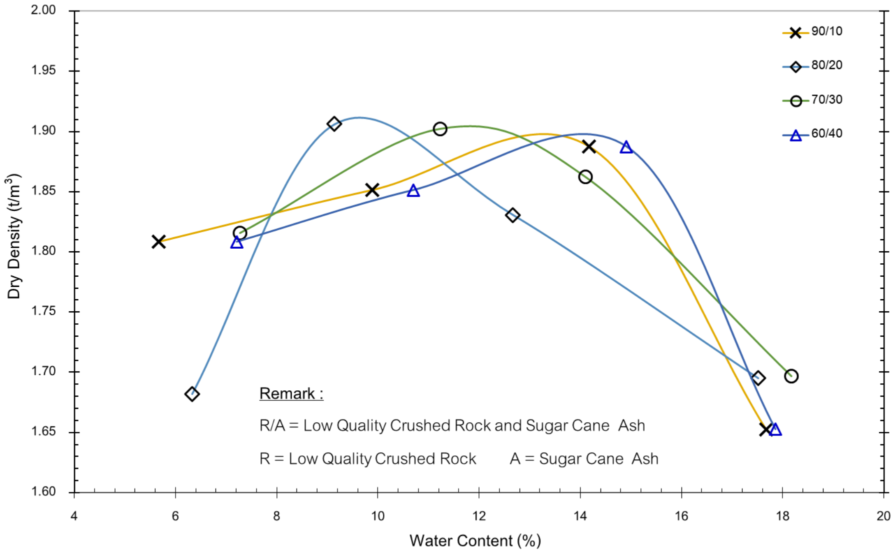


Figure 5 Compaction curves of low quality crushed rocks mixed with sugar cane ash.

Table 2 Maximum dry density and Optimum Moisture Content

R/A	90/10	80/20	70/30	60/40	Average
MDD (t/m^3)	1.90	1.91	1.90	1.89	1.90
%OMC	13.0	9.0	12.0	14.5	12.1

กำลังอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว(Uniaxial Compressive Strength, q_u) ของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ จากตัวอย่างที่ส่วนผสมของหินปลายตะแกรงต่อเถ้าชานอ้อย (R/A) เท่ากับ 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยการผสมซีเมนต์ คงที่ 4% โดยน้ำหนักแห้ง แล้วทำการเตรียมตัวอย่าง โดยการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) ที่ปริมาณความชื้น เท่ากับ 12 % โดยตัวอย่างที่บดอัดแล้วแล้วจะถูกบ่มให้มีการพัฒนากำลังอัดไว้ที่อายุ 7 วัน และ 14 วัน ดังแสดงในรูป Figure 6 เมื่อครบอายุการบ่มตัวอย่างแล้วจะนำตัวอย่างไปแช่น้ำทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

Figure 6 Curing of specimens at 7 and 14 days.

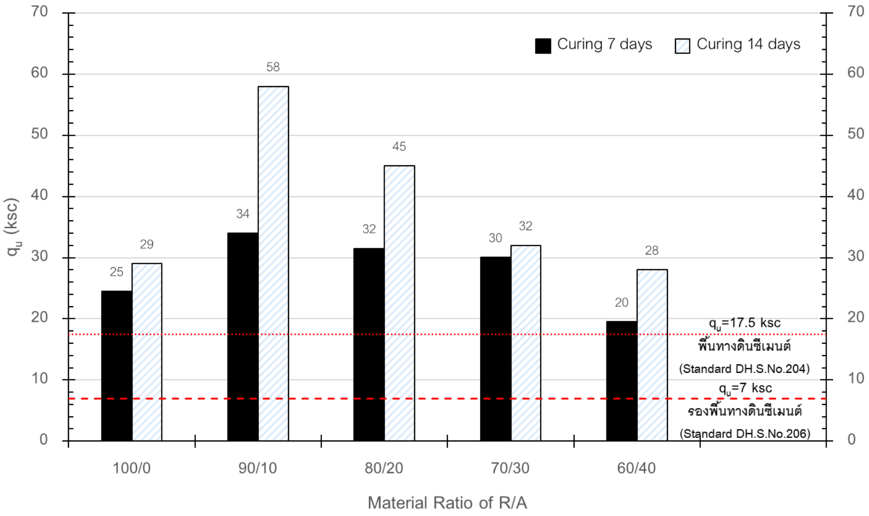


Figure 7 Unconfined compressive strength of low-quality crushed rocks mixed with sugar cane ash and 4% cement.

ผลการทดสอบ ดังรูป Figure 7 พบว่า หินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม กล่าวคือ กำลังอัดที่อายุ 14 วัน มีค่าสูงกว่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน ตัวอย่างที่ส่วนผสม R/A เท่ากับ 90/10 คือ ตัวอย่างที่มีหินปลายตะแกรง 90% ผสมกับเถ้าชานอ้อย 10% และซีเมนต์ 4% คงที่ โดยน้ำหนักแห้ง มีกำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกำลังอัดของส่วนผสมอื่น โดยที่อายุการบ่ม 7 และ 14 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุด(q_u) ประมาณ 34 kg/cm^2 และ 58 kg/cm^2 ตามลำดับ

ผลการทดสอบ แสดงว่า การใช้เถ้าชานอ้อยเป็นส่วนผสมมากขึ้น มีผลให้กำลังอัดลดลง (กล่าวคือ กำลังอัดที่ส่วนผสม 90/10 > 80/20 > 70/30 > 60/40) อย่างไรก็ตาม แม้ว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่ส่วนผสม R/A เท่ากับ 60/40 (หินปลายตะแกรง 60% ผสมเถ้าชานอ้อยที่ 40% และซีเมนต์ 4% คงที่ โดยน้ำหนักแห้ง) ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังอัดต่ำประมาณ 20 ksc แต่ค่ากำลังอัดในระดับนี้ ยังคงถือว่าเป็นกำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ ทล.ม.204 สำหรับใช้

ในงานวัสดุพื้นทางดินซีเมนต์ เท่ากับ 17.5 ksc (กรมทางหลวง, 2556) และผ่านมาตรฐาน ทล.ม.206 สำหรับใช้ในงานวัสดุรองพื้นทางดินซีเมนต์ เท่ากับ 7 ksc (กรมทางหลวง, 2532) โดยทั่วไป ดินซีเมนต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ดังนั้น การใช้เถ้าชานอ้อย 40% ทดแทนหินปลายตะแกรง จัดว่ามีแนวโน้มใช้ในงานวัสดุก่อสร้างทางได้ การใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุทดแทนมีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวใกล้เคียงและผ่านเกณฑ์มาตรฐานสอดคล้องกับการนำไปใช้งานได้จริง โดยไม่ก่อให้เกิดความล่าช้าในการทำงานในสนามที่โดยทั่วไปมีการกำหนดให้งานบดอัดก่อสร้างชั้นทางในแต่ละชั้นไม่ควรเกิน 7 วัน

สรุป

1. หินปลายตะแกรงที่นำมาทำการศึกษาครั้งนี้ จัดกลุ่มดินตามระบบ Unified Soil Classification System ได้เป็น SW-SC ลักษณะเป็นทรายขนาดคละดีและมีกรวดกับดินเหนียวผสมอยู่(Well-graded sand with clay and gravel) ตามระบบ AASHTO ได้เป็นกลุ่ม A-2-4 ค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.65 ค่า Liquid Limit เท่ากับ 20.60%, Plastic Limit เท่ากับ 16.92%, Plasticity Index เท่ากับ 3.68% และมีค่าความชื้นจากสถานที่เก็บตัวอย่าง เท่ากับ 2.1-3.5%
2. เถ้าชานอ้อยที่นำมาทำการศึกษาครั้งนี้ จัดกลุ่มดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ได้เป็นดินทรายผสมทรายแป้งที่ไม่มีความเหนียว (Silty Sand) หรือ SM และตามระบบ AASHTO จำแนกได้เป็นดินกลุ่ม A4 ค่าความถ่วงจำเพาะ Specific gravity (G_s) ประมาณ 2.15 เถ้าชานอ้อยไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก (Non-Plastic) และมีค่าความชื้นจากสถานที่เก็บตัวอย่าง เท่ากับ 9.30 %
3. พฤติกรรมการบดอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อย ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) อยู่ระหว่าง 1.89 -1.91 t/m^3 โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.90 t/m^3 และมีค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ในการบดอัดอยู่ในช่วง 9% ถึง 14.50 % โดยมีค่า %OMC เฉลี่ยเท่ากับ 12.1 % ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่ใช้ในการบดอัดเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม
4. ผลการทดสอบ UCS แสดงว่า ทุกส่วนผสมของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ 4% มีแนวโน้มค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยที่สัดส่วนการเถ้าชานอ้อย 10% (R/A = 90/10) เป็นสัดส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดดีที่สุด คือ 34 ksc และ 58 ksc ที่อายุการบ่ม 7 วันและ 14 วัน ตามลำดับ
5. การใช้เถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น ที่ 20% (R/A = 80/20) ถึง 40% (R/A = 60/40) ส่งผลให้กำลังอัดลดลง อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 มีค่ามากกว่า 17.5 ksc ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทาง
6. ผลการศึกษา แสดงว่า การปรับปรุงหินปลายตะแกรงโดยการผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ มีแนวโน้มนำไปใช้งานได้จริงสำหรับการใช้เป็นวัสดุก่อสร้างชั้นทาง การใช้เถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นการเพิ่มคุณค่าวัสดุเหลือทิ้ง ช่วยให้ลดปริมาณการใช้หินปลายตะแกรงลงได้
7. จากผลการศึกษาครั้งนี้ มีข้อแนะนำในการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้ คือ

   7.1 การศึกษาผลการพัฒนากำลัง ที่อายุการบ่มมากขึ้น ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน, 56 วัน และ 90 วัน

7.2 การใช้วัสดุปอซโซลานอื่นๆ เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าลอย เถ้าแกลบ เป็นต้น เพื่อลดปริมาณการใช้หินคลุกปลายตะแกรง ข้อดีของการใช้วัสดุผสมเพิ่มอื่นๆ มีผลต่อการพัฒนากำลังของวัสดุชั้นทางในระยะยาว โดยเป็นไปตามกลไกการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณ โรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น ที่มอบวัสดุเถ้าชานอ้อย และโรงงานโม่หินศิลาเจริญกิจ จ.สระบุรี สำหรับวัสดุหินปลายตะแกรงเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง. 2532. **มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase).** ทล.ม.206 (Standard DH.S.No.206). กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรุงเทพฯ.

กรมทางหลวง. 2556. **มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์** (Soil Cement Base). ทล.ม. 204 (Standard DH.S.No.204). กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรุงเทพฯ.

จิรวัฒน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2560. **คุณสมบัติเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์และหินฝุ่น**. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 2 , มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม (RMU GRC 2017). มหาสารคาม. หน้า 542 ถึง 547.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2555. การใช้เถ้าชานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. **วารสารคอนกรีต**. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข. 2556. การปรับปรุงหินคลุกด้อยคุณภาพเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง. วิ**ศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา** 24(3): 1-7

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข และ สุนิต ประเวระทัง. 2563. ศักยภาพการนำเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์มาใช้ทดแทนวัสดุในงานทาง. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา** 31(2)11.

สุวิมล สัจจวาณิชย์. 2546. ผลกระทบของเถ้าชานอ้อยในลักษณะวัสดุประสาน. **วิศวกรรมสาร มก**. 48: 18-22.

การศึกษาคุณสมบัติของหินคลุกที่ผสมด้วยมวลรวมเปลือกหอยแครงเพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง

The Study of Property Mix of Crushed Rock by Cockle Shell Aggregates for Highway Material

<u>ธนโชติ รอดเสวก</u>[1*] ก่อโชค จันทวรางกูร[1] และ ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข[1]

<u>Tanachote Rodsweak</u>[1*], Korchoke Chantawarangul[1] and Thaweesak Piti-khunpongsuk[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำมวลรวมเปลือกหอยแครง ซึ่งเป็นวัสดุขยะเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี มาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางโดยผสมแทนที่หินคลุก ในอัตราส่วนผสม 0%, 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% โดยน้ำหนักของหินคลุก ที่การแช่น้ำ 0 วัน, 4 วัน และ 30 วัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุในระยะยาว ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าปริมาณมวลรวมเปลือกหอยแครงที่นำมาผสมแทนที่หินคลุก มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของหินคลุก ปริมาณมวลรวมเปลือกหอยแครงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ ค่า Soaked CBR ลดลง ความหนาแน่นแห้งลดลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนผสม 10% มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุก กรมทางหลวงชนบท สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้ และต้นทุนในงานก่อสร้างยังถูกกว่าหินคลุก สรุปได้ว่ามวลรวมเปลือกหอยแครง ซึ่งเป็นวัสดุขยะเหลือทิ้งนั้น หากนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้าง ต้องใช้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม จึงจะผ่านเกณฑ์การทดสอบวัสดุงานทาง ทั้งนี้ยังเป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดและยังลดต้นทุนค่าก่อสร้างได้

ABSTRACT

This research studies the usage of cockle shell aggregates which are waste materials from food industry in Surat Thani as base course to replace crushed rock in mixture with the mixing ratios of 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% of crushed rock weight soaked in the water for 0, 4 and 30 day(s) to study the material property in the long term. The study was found that the cockle shell aggregates used to mix as a replacement of crushed rock affected the crushed rock properties. The increased cockle shell aggregates resulted in the reduction of soaked CBR value and dry density while suitable moisture content used to crush increased. The 10% mixing ratio was qualified and passed the standard criterion of crushed rock base course which can be used by the Department of rural roads in construction and cost of construction using cockle shell is lower than that using crushed rock. It is therefore concluded that cockle shell aggregates as waste material to be used as construction material must be used with appropriate ratio to pass the test criteria of base course. This will reduce the use of limited natural resource and cost of construction.

Key words: cockle shell aggregates, crushed rock, proportion, property

* Corresponding author; e-mail address: **tanachote2010@hotmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การก่อสร้างชั้นพื้นทางของถนนลาดยางจะใช้วัสดุเช่น หินคลุก ในพื้นที่ใกล้ๆกับบริเวณก่อสร้าง เนื่องจากง่ายต่อการขนส่ง แต่เนื่องด้วยทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้ในอนาคตราคาหินคลุกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จากปัญหาดังกล่าวจึงควรพัฒนาวัสดุในพื้นที่ให้มีปริมาณที่เพียงพอและมีคุณภาพ ผ่านมาตรฐานการก่อสร้าง จะเป็นแนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าว และเป็นการลดการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด จังหวัดสุราษฎร์ธานีเป็นแหล่งอุตสาหกรรมอาหารทะเลที่มีความสำคัญ ซึ่งทุกปีมีวัสดุขยะเหลือทิ้งปริมาณมาก ซึ่งวัสดุขยะเหลือทิ้งบางประเภทสามารถนำมาพัฒนาในด้านต่างๆได้ เช่น เปลือกหอยแครง เป็นต้น เปลือกหอยแครงประกอบด้วยสารจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ เมื่อมีสารประกอบแคลเซียมเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ จึงทำให้เปลือกหอยแครงมีความแข็งแรงและคงทนสูง ทำให้มีแนวคิดในการพัฒนาเปลือกหอยแครงในงานทางวิศวกรรมเช่น ปูนซีเมนต์ คอนกรีต เป็นต้น การปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางหินคลุก ปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคการปรับปรุงเชิงกายภาพโดยผสมวัสดุที่มีคุณภาพดีกว่าเพิ่มเข้าไป หรือนำไปแทนที่วัสดุเดิม ทำให้วัสดุงานทางสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ (พงศกร , 2557) ดังนั้นหากนำมวลรวมเปลือกหอยแครง ซึ่งทำมาจากเปลือกหอยแครง นำมาใช้แทนที่หินคลุกแล้วมีคุณสมบัติวัสดุทางวิศวกรรมผ่านตามเกณฑ์การทดสอบวัสดุ จะทำให้สามารถนำไปใช้งานได้จริง รวมถึงเป็นการลดการใช้หินคลุกซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดด้วย แต่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วนผสมระหว่างมวลรวมเปลือกหอยแครงกับหินคลุก ต้องมีปริมาณที่เหมาะสมจึงจะใช้เป็นวัสดุในงานทางได้ การพัฒนามวลรวมเปลือกหอยแครงนี้เป็นการพัฒนาวัสดุขยะเหลือทิ้งในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์ จัดการกับปัญหาสิ่งแวดล้อมและยังสามารถลดต้นทุนค่าก่อสร้างได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หินคลุกคือหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต) ที่ย่อยจนมี เกรดเดชั่นโดยเป็นหินที่มีขนาดแตกต่างกันมาผสมกันเช่นหินขนาด 1นิ้ว,3/4นิ้ว,3/8นิ้ว และหินฝุ่น เป็นต้น โดยส่วนมากใช้สำหรับชั้นพื้นทางในงานถนนลาดยางสามารถใช้ถมถนนร่วมกับลูกรังได้

เปลือกหอยแครงประกอบด้วยสารจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ จากการทำอุตสาหกรรมหอยแครง ทำให้มีเปลือกหอยปริมาณมากทิ้งไว้ตามแหล่งเลี้ยงและใกล้ๆบริเวณประกอบการ ซึ่งมีการนำมาทำมวลรวมหยาบมาผสมกับเถ้าแกลบใช้เป็นแร่ผสมเพิ่มใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ ผสมในอิฐ และผสมในคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้มวลรวมเปลือกหอยแครง ได้มาจากการนำเปลือกหอยแครงผสมเข้ากับเปลือกหอยแครงบด โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักที่เท่ากัน (1:1)

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัสดุ

1. บดเปลือกหอยแครงจำนวน 30 กก. ด้วยรถแบคโฮ จนเปลือกหอยแครงมีลักษณะแบนเรียบและเป็นเม็ดผง
2. นำเปลือกหอยแครง 30 กก.ผสมด้วยเปลือกหอยแครงบด 30 กก. จะได้วัสดุมวลรวมเปลือกหอยแครง 60 กก.

3. ผสมแทนที่หินคลุก ด้วยมวลรวมเปลือกหอยแครงในอัตราส่วน 0%, 10%, 20%, 30%,40% และ 50% โดยน้ำหนักของหินคลุก โดยการทดสอบ Soaked CBR จะทดสอบที่การแช่น้ำ 0วัน, 4วัน และ 30วัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุในระยะยาว

Figure 1 Cockle shell aggregate.

Figure 2 Mix of crushed rock by cockle shell Aggregate.

การทดสอบวัสดุ

1. ทดสอบ Sieve analysis และ Abrasion test ตามมาตรฐานวัสดุพื้นทางหินคลุก กรมทางหลวงชนบท
2. ทดสอบ Compaction test (Modified proctor) และ California bearing ratio test (Soaked) ตามมาตรฐานวัสดุพื้นทางหินคลุก กรมทางหลวงชนบท

Figure 3 Sieve analysis.

Figure 4 Abrasion test.

Figure 5 Soaked CBR.

การเปรียบเทียบราคาก่อสร้าง

ตามหลักเกณฑ์การคำนวณราคากลางงานก่อสร้าง ทาง สะพาน และท่อเหลี่ยม ตุลาคม 2560 กรมบัญชีกลางซึ่งประกอบด้วยปัจจัยทางด้านราคาวัสดุ , ด้านขนส่งและด้านการดำเนินการ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

มาตรฐานวัสดุพื้นทางหินคลุก กรมทางหลวงชนบทประกอบด้วย 4 การทดสอบหลักๆ ซึ่งผลการศึกษาทางด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรมของหินคลุกที่ผสมแทนที่ด้วยมวลรวมเปลือกหอยแครงแสดงดังต่อไปนี้

1. Sieve analysis จาก Figure 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นการผ่านตะแกรงกับขนาดของตะแกรง ซึ่งแนวโน้มของขนาดคละนั้นจะมีเปอร์เซ็นการผ่านตะแกรงลดลง เมื่อผสมมวลรวมเปลือหอยแครงเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนผสมด้วยมวลรวมเปลือกหอยแครง 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% นั้นมีค่าผ่านเกณฑ์การทดสอบ Sieve analysis ตามมาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทาง กรมทางหลวงชนบท

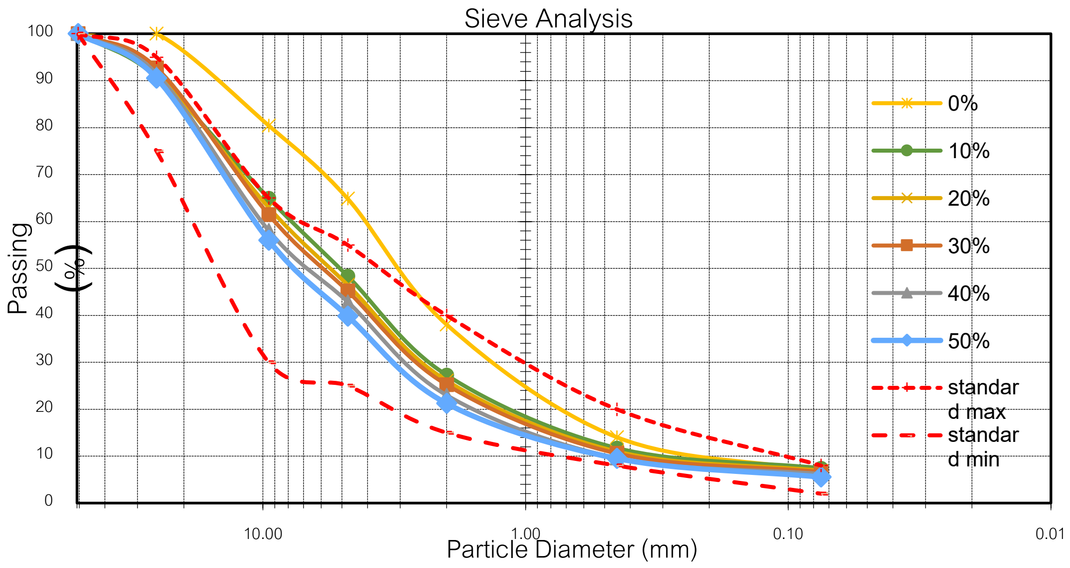


Figure 6 the relationship with Passing and Particle Diameter.

2. Abrasion test พฤติกรรมของการสึกหรอ จะแปรผกผันกับปริมาณมวลรวมเปลือกหอยแครงที่ผสมเพิ่ม Figure 7 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักคงเหลือบนตะแกรงกับจำนวนรอบการหมุนเครื่อง los angeles machine โดยที่การหมุน 500 รอบ อัตราส่วนผสมมวลรวมเปลือกหอยแครงที่ 0% เหลือวัสดุบนตะแกรงเบอร์ 12 มากที่สุดที่ 3745 กรัมสูญเสียไป 1255 กรัมคิดเป็น 25.10% และอัตราส่วนผสมมวลรวมเปลือกหอยแครง 50% เหลือวัสดุบนตะแกรงน้อยที่สุด 3446 กรัมสูญเสียไป 1554 กรัมคิดเป็น 31.08% ซึ่งมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทกำหนดไว้ว่า สูญเสียวัสดุต้องไม่เกิน 40% โดยทุกอัตราส่วนผสมมวลรวมเปลือกหอยแครง 0%, 10%, 20%, 30%, 40% และ50% นั้นมีค่าผ่านเกณฑ์การทดสอบ Abrasion test ตามมาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางกรมทาง

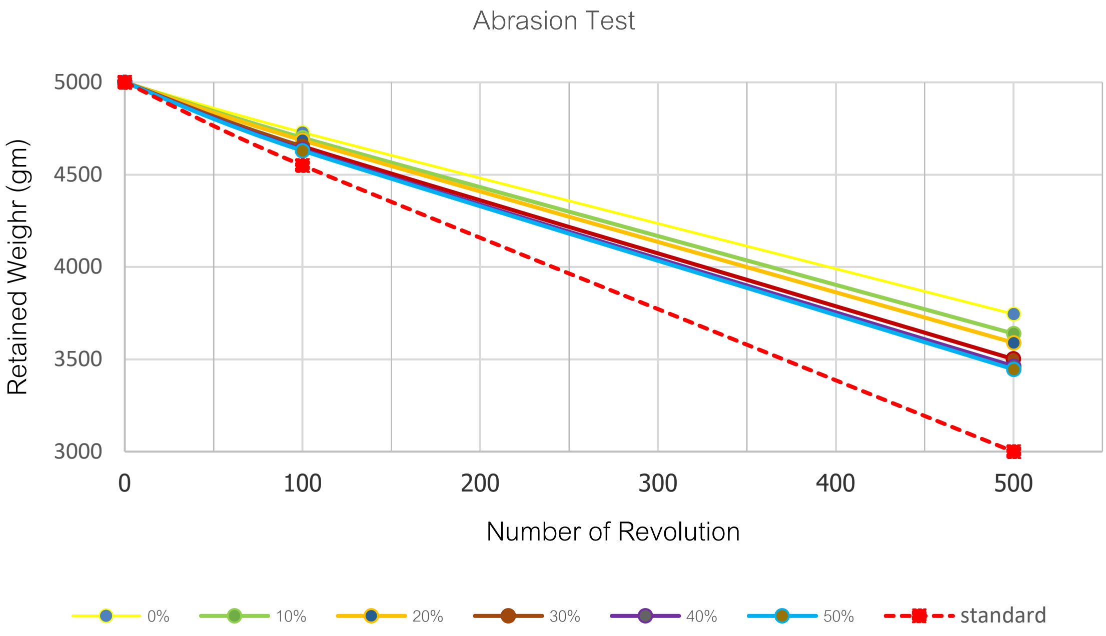


Figure 7 the relationship with Retained Weight and Number of Revolution.

3. Compaction test พฤติกรรมการบดอัดเป็นไปตาม Figure 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น โดยการศึกษาในครั้งนี้เป็นวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ซึ่งหินคลุกที่อัตราส่วนผสมมวลรวมเปลือกหอยแครง 0% มีความหนาแน่นแห้ง 2.38 gm. /cc. โดยมีปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับการบดอัด 5.48% และอัตราส่วนผสมมวลรวมเปลือกหอยแครง 50% มีความหนาแน่นแห้ง 2.02 gm. /cc. โดยมีปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับการบดอัด 11.16%

โดยอัตราส่วนผสมมวลรวมเปลือกหอยแครงที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่ใช้ในบดอัดมากขึ้นและความหนาแน่นแห้งลดลง เมื่อความหนาแน่นแห้งลดลงจะส่งผลให้กำลังการรับน้ำหนักของโครงสร้างชั้นพื้นทางลดลงด้วยเช่นกัน

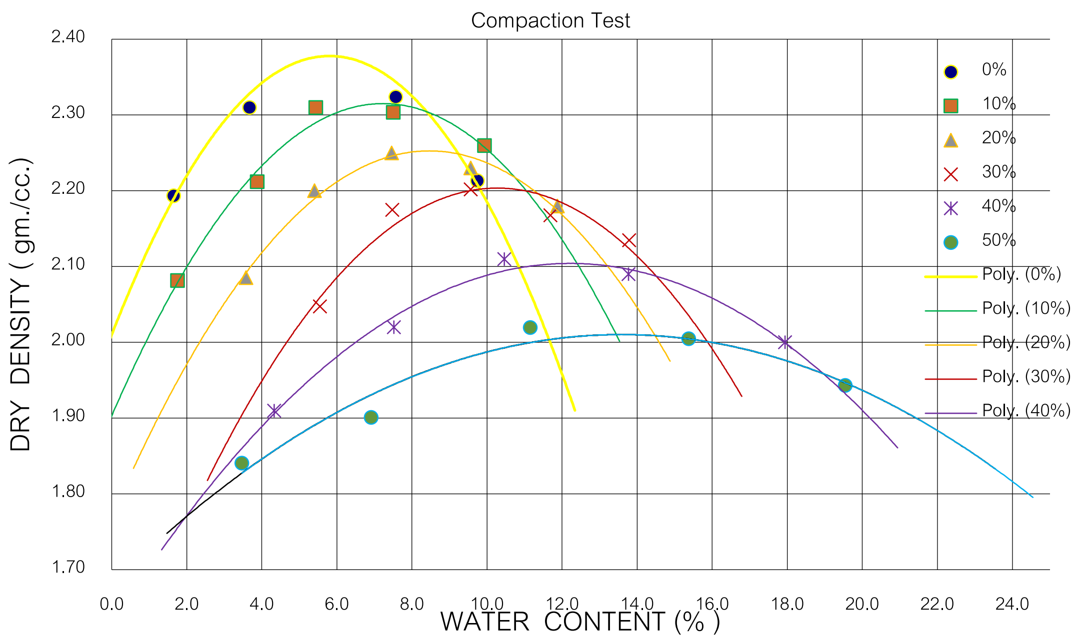


Figure 8 the relationship with dry density and water content .

4. California bearing ratio test จาก Figure 9 ค่า Soaked CBR นั้นจะแปรผันตาม 2 ปัจจัย 1. ปริมาณมวลรวมเปลือกหอยแครง 2. ระยะเวลาการแช่น้ำ

1. ปริมาณมวลรวมเปลือกหอยแครง อัตราส่วนผสมมวลรวมเปลือกหอยแครงที่ 0% และ 10%เป็น 2 อัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุก กรมทางหลวงชนบท ซึ่ง Soaked CBR ต้องไม่น้อยกว่า 80% ซึ่งได้ค่า Soaked CBR ที่การแช่น้ำ 4 วัน เท่ากับ 86.32% และ 82.15% ตามลำดับ

2. ระยะเวลาการแช่น้ำ ระยะเวลาการแช่น้ำที่นานขึ้น ส่งผลให้ค่า Soaked CBR ลดลง ระยะเวลาการแช่น้ำไม่ได้พัฒนาค่า Soaked CBR ให้สูงขึ้น แต่จะเพิ่มปริมาณความชื้นให้แก่วัสดุ ทำวัสดุเกิดการอิ่มตัวด้วยน้ำ ส่งผลให้ค่า Soaked CBR ลดลงในที่สุด

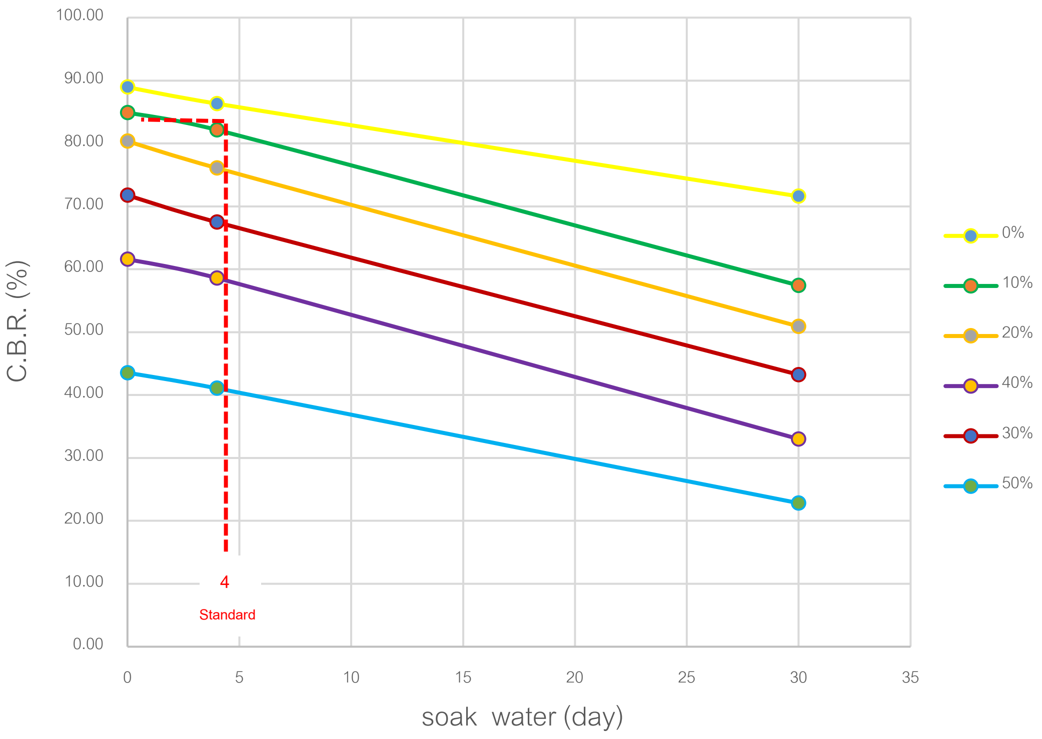


Figure 9 the relationship with C.B.R. and soak water.

การเปรียบเทียบราคาก่อสร้างระหว่างชั้นพื้นทางหินคลุกและชั้นพื้นทางหินคลุกที่ผสมแทนที่ด้วยมวลรวมเปลือกหอยแครง

การเปรียบเทียบราคาก่อสร้างในชั้นพื้นทางนี้ จะคิดอัตราการแทนที่หินคลุกด้วยมวลรวมเปลือกหอยแครงที่ 10% ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ผ่านมาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุก กรมทางหลวงชนบท โดยจะกำหนดราคาค่าก่อสร้างโดยอ้างอิงตาม หลักเกณฑ์การคำนวณราคากลางงานก่อสร้าง ทาง สะพาน และท่อเหลี่ยม ตุลาคม 2560 กรมบัญชีกลางซึ่งมีปัจจัยทางด้านราคาวัสดุ, ด้านขนส่งและด้านการดำเนินการ

Table 1 Comparison of construction cost with crushed rock and cockle shell aggregate.

List	Crushed rock	Cockle shell aggregate	Unit cost
Local material cost	246.5	0	Bath/ Cubic meter (loose)
Material transportation distance	49	24	Kilometer
Delivery cost	160.34	79.44	Bath/ Cubic meter (loose)
Sum[1/]	406.84	79.44	Bath/ Cubic meter (loose)
Tolerances (50%)[2/]	610.26	119.16	Bath/ Cubic meter (dense)
Operation cost + Depreciation for excavation, carriage (OD)	0	32.19	Bath/ Cubic meter (loose)
Operation cost + Mixed depreciation (OM)	25.05	0	Bath/ Cubic meter (dense)
Operation cost + Compaction depreciation (OC)	89.87	0	Bath/ Cubic meter (dense)
Summary[3/]	725.18	151.35	Bath/ Cubic meter

1/ Sum = Local material cost + Delivery cost
2/ Tolerances (50%) = Sum x 1.50
3/ Summary = Tolerances (50%) + OD + OM + OC

การศึกษางานก่อสร้างถนนลาดยางในพื้นที่ อ.ท่าฉาง จ.สุราษฎร์ธานี พบว่าราคามวลรวมเปลือกหอยแครง (151.35 บาท/ลบ.ม.) ต่ำกว่าราคาหินคลุก (725.18 บาท/ลบ.ม.) ซึ่งเมื่อคำนวณราคาค่าก่อสร้างจากการก่อสร้างถนนจริงโดยชั้นพื้นทางมีปริมาตรเท่ากับ 1818.18 m^3 ถ้าใช้หินคลุกล้วนในการก่อสร้างราคาค่าก่อสร้างจะเท่ากับ 1,450,360 บาท แต่ถ้าใช้หินคลุกที่ผสมด้วยมวลรวมเปลือกหอยแครงโดยแทนที่น้ำหนักของหินคลุก 10% ราคาค่าก่อสร้างจะเท่ากับ 1,273,377 บาท (ซึ่งถูกกว่าหินคลุกล้วน 176,983 บาท) ช่วยประหยัดงบประมาณและลดราคาค่าก่อสร้างได้

สรุป

มวลรวมเปลือกหอยแครงในอัตราส่วนผสมแทนที่ ที่มากขึ้นยิ่งทำให้คุณสมบัติต่างๆทางวิศวกรรมของหินคลุกเปลี่ยนแปลงไปเช่น ค่าความหนาแน่นแห้งลดลง ค่าเปอร์เซ็นการผ่านตะแกรงลดลง ค่า Soaked CBR ลดลง และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดเพิ่มขึ้นเป็นต้น สำหรับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการแทนที่หินคลุกคือ 10% โดยน้ำหนักของหินคลุก ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุกกรมทางหลวงชนบท เมื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้างจริง นอกจากวัสดุจะมีคุณภาพตามมาตรฐานแล้ว ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้ เป็นการลดการใช้หินคลุกซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งเป็นการจัดการกับปัญหาสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กลุ่มผู้ประกอบการฟาร์มหอยแครงจังหวัดสุราษฎร์ธานีที่รวบรวมเปลือกหอยแครงสำหรับการทดสอบวัสดุ, โรงโม่หินบริษัท ศิลาชัยสุราษฎร์ จำกัด ที่ให้หินคลุกสำหรับการทดสอบวัสดุ และขอขอบคุณสำนักงานทางหลวงชนบทที่ 11 (สุราษฎร์ธานี) ที่ให้ใช้ห้องทดสอบวัสดุงานทาง

เอกสารอ้างอิง

กฤษดา แท้เที่ยง. 2554. **สมบัติของคอนกรีตมวลรวมเปลือกหอยแครงเติมเถ้าแกลบขาว**. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์,สงขลา.

กรมทางหลวงชนบท. 2557. **มาตรฐานวัสดุพื้นทางหินคลุก**. กรมทางหลวงชนบท, กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข. 2556. **การปรับปรุงหินคลุกด้อยคุณภาพเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง**. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา 24(3): 1-7.

ธงชัย รุ่งเรือง. 2556. **การปรับปรุงคุณภาพวัสดุหินคลุกซีเมนต์ชั้นพื้นทางเดิมผสมผิวแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมด้วยปูนซีเมนต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

พงศกร เนียมรินทร์. 2557. **การศึกษาคุณสมบัติของดินขาวที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยเถ้าไม้ยางพาราเพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทาง**. การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Waltham, A.C. 1994. **Foundations of Engineering Geology**. Blackie Academy and Professional, London, 88p.

การประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดเพื่อควบคุมฝุ่นในพื้นที่ก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยีไอโอที อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง

Application of Measurement System for Dust Control in Construction Site using IOT (Internet of things) Technology

<u>อดิศักดิ์ ประพันธ์กุล</u>[1] และ อภินิติ โชติสังกาศ[1*]

<u>Adisak Prapankun</u>[1] and Apiniti Jotisankasa[1*]

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยงานก่อสร้างมักจะมีหลายกิจกรรมเป็นงานที่ก่อให้เกิดฝุ่นละออง ซึ่งเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของคนงานก่อสร้างรวมถึงบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง งานวิจัยนี้จึงเสนอต้นแบบและการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นเพื่อควบคุมฝุ่นในพื้นที่ก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยี IOT (Internet of Things) เพื่อช่วยในการเข้าถึงและรับรู้ปริมาณฝุ่นก่อสร้างจากการวัดค่าโดยใช้เซ็นเซอร์ในการตรวจวัดแล้วส่งผ่านข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต เพื่อให้ได้ข้อมูลแบบตามเวลาจริง (Real-Time) ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการควบคุมปริมาณฝุ่นจากงานก่อสร้างได้ งานวิจัยนี้พบว่าการตรวจวัดปริมาณฝุ่นจากเซ็นเซอร์ สามารถตรวจวัดปริมาณฝุ่นและส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายได้ดี อีกทั้งสั่งการระบบพ่นน้ำแบบหมอกสามารถควบคุมปริมาณฝุ่น PM10 ได้ จากผลการทดสอบในพื้นที่ก่อสร้างขนาด 400 ตารางเมตร พบว่าต้องเปิดระบบพ่นหมอกเป็นเวลา 20-40 นาทีเพื่อช่วยลดค่า PM10 ให้กลับมาอยู่ภายในมาตรฐาน ระบบต้นแบบนี้สามารถนำไปใช้เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการก่อให้เกิดฝุ่นในการก่อสร้างต่อไป

ABSTRACT

In construction sites, there are often many activities that cause dust, posing environmental problems and adverse effect on health of construction workers and neighborhoods, This research presents a prototype and the application of measurement systems for dust control in construction sites by using Internet of Things (IOT) technology. To be aware of the amount of construction dust on site, the system make use of commercial sensors to measure and transmit data to the internet which displays information in real-time. Based on a pilot study in a construction space of 400 m^2, the measurement of dust from sensors was sent online through the network and used to turn on the mist maker automatically to reduce the PM10 level. The mist turning on time was around 20-40 minutes to bring back the PM10 level to the safe value.

Key words: dust sensor, PM2.5, PM10, dust control in construction site, IOT (Internet of Things)

* Corresponding author; e-mail address: **fengatj@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Engineering, Faculty of Civil Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

หากพิจารณากิจกรรมในโครงการก่อสร้าง มักพบว่าหลายๆกิจกรรมในงานก่อสร้างนั้นก่อให้เกิดฝุ่นละออง เช่นงานตัดไม้แบบ งานสกัดพื้นคอนกรีต งานเจียแต่งปูนเปลือย งานขัดผนังทาสี งานบดอัดถนน ฝุ่นละอองในบรรยากาศเป็นปัญหามลพิษทางอากาศที่สำคัญที่สำคัญโดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก หรือฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) หากพบค่าเกินมาตรฐานคุณภาพอากาศ จะส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของประชาชน โดยเฉพาะผู้ที่อยู่ในกลุ่มเสี่ยง ได้แก่ เด็ก ผู้สูงอายุ รวมถึงแรงงานที่ทำงานใกล้ชิดแหล่งที่ก่อให้เกิดฝุ่น อย่างเช่นในโครงการก่อสร้าง การตรวจวัดและการควบคุมปริมาณฝุ่นในปัจจุบันยังขาดเครื่องมือในการตรวจวัดปริมาณฝุ่นแบบตามเวลาจริง (Real-Time) ซึ่งไม่สามารถนำข้อมูลมาใช้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเหตุแบบทันที

ผู้วิจัยจึงได้จัดทำงานวิจัยนี้ โดยศึกษาการใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่น (Dust Sensor) ที่สามารถแสดงผลได้แบบตามเวลาจริง และการควบคุมปริมาณฝุ่นโดยใช้ระบบรดน้ำแบบหมอก (Spray Fogging System) ผ่านการสั่งการโดยใช้เครือข่ายไร้สาย (Wireless sensor Network) โดย Code ในการเขียนโปรแกรมใช้โปรแกรม Arduino และได้ทำการวิจัยภายในโครงการก่อสร้างกองบัญชาการตำรวจสอบสวนกลาง (เมืองทอง) ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ ตำบลบ้านใหม่ อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี เพื่อให้การทราบค่าและการป้องกันฝุ่นเป็นไปโดยอัตโนมัติ เพื่อไม่ให้ฝุ่นละอองเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด และควบคุมค่าฝุ่นละอองในงานก่อสร้างไม่เกินค่ามาตรฐานตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 24 (พ.ศ.2547) และกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กำหนดไว้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 24 (พ.ศ.2547) เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) ในเวลา 24 ชั่วโมง จะต้องไม่เกิน 0.12 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือ 120 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่ามัชฌิมเลขคณิต (Arithmetic Mean) ในเวลา 1 ปี ต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้วิธีการตรวจวัดตามระบบกราวิเมตริก (Gravimetric) ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างชนิดไฮโวลุม (High Volume Air Sampler) และระบบเบต้า เร (Beta Ray) ที่ใช้หลักการฉายรังสีเบต้าไปยังฝุ่นละอองบนแผ่นกรอง และวัดความสามารถในการดูดซับรังสีเบต้าเพื่อนำมาแปลงเป็นค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ได้ระบุว่า ค่าปริมาณฝุ่นจากงานก่อสร้าง ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่นละอองตลอดช่วงเวลาที่ตรวจวัด ต้องน้อยกว่า 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อทำการตรวจวัดพร้อมกัน ทั้งนี้การตรวจวัดต้องทำพร้อมกันและต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 290 นาที (4 ชั่วโมง 50 นาที) และไม่เกิน 310 นาที (5 ชั่วโมง 10 นาที) ในช่วงเวลาที่มีการก่อสร้าง

ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการการรับรู้และป้องกันการเกิดฝุ่นจากการทำงานก่อสร้างด้วยเซ็นเซอร์ โดยค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) ต้องไม่เกินตามค่ามาตรฐาน จึงได้ตั้งค่าไว้ที่ไม่เกิน 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นค่าที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมอุปกรณ์

1. ประกอบอุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดฝุ่น (Dust Sensor PMS5003 G5) และเชื่อมต่อกับแผงวงจรควบคุม (Node MCU/ESP8266) ติดตั้งอยู่ในกล่องรูปแบบที่กะทัดรัดและสามารถเคลื่อนย้ายได้ การทำงานของเซ็นเซอร์ใช้หลักการกระเจิงของแสงเลเซอร์ โดยเซ็นเซอร์นั้นประเมินผลของแสงเลเซอร์ที่ไปกระทบกับอนุภาคแขวนลอยในอากาศ จากนั้นรวบรวมแสงกระเจิงในระดับหนึ่งและเส้นโค้งของแสงกระเจิงที่เปลี่ยนไปตามเวลา เซ็นเซอร์จะมีระบบคำนวณค่าระดับปริมาณฝุ่นและขนาดอนุภาคต่างๆ ต่อหน่วยปริมาตรสามารถคำนวณได้โดยไมโครโปรเซสเซอร์

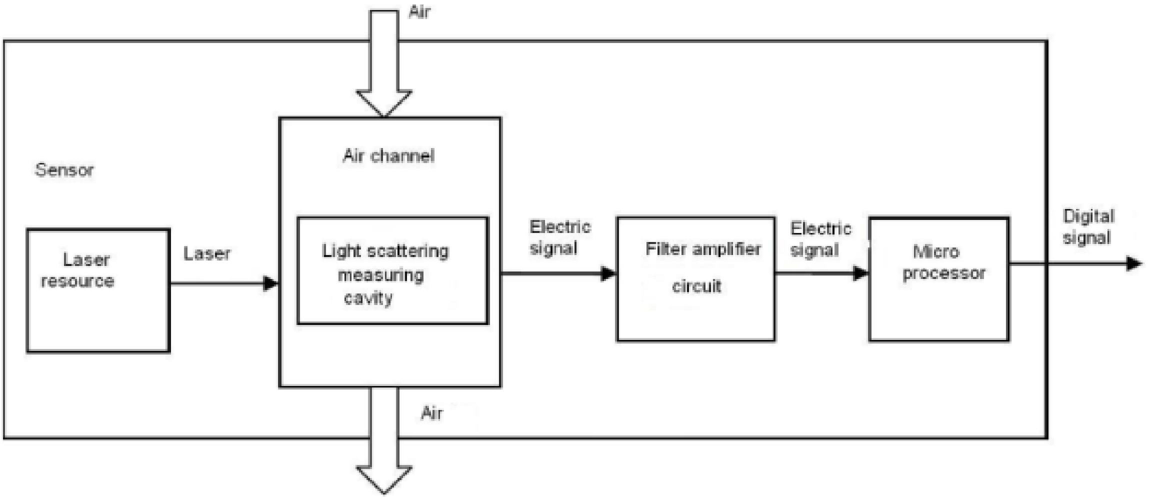


Figure 1 Functional block diagram of sensor. (2016 product data manual of PLANTOWER)

Figure 2 Digital universal particle concentration sensor PMS5003 series. (2016 product data manual of PLANTOWER)

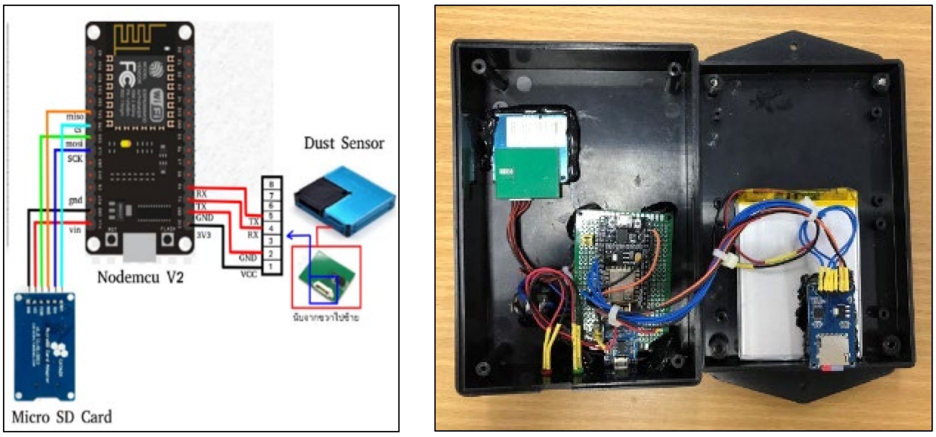


Figure 3 Measuring sensor device PMS5003.

2.แผงวงจรควบคุมการสั่งการจ่ายไฟฟ้า เปิด/ปิด ปั๊มน้ำ (Node MCU/ESP8266) ทำการเชื่อมต่อแผงควบคุมและเขียนโปรแกรมในการเปิดปั๊มน้ำให้ระบบพ่นน้ำแบบหมอกทำงาน ในกรณีที่รับค่าฝุ่นจากเซ็นเซอร์เกินค่าที่ตั้งไว้ คือ 50 µg./m^3 และ ปิดปั๊มน้ำในกรณีที่ค่าฝุ่นต่ำกว่า 50 µg./m^3

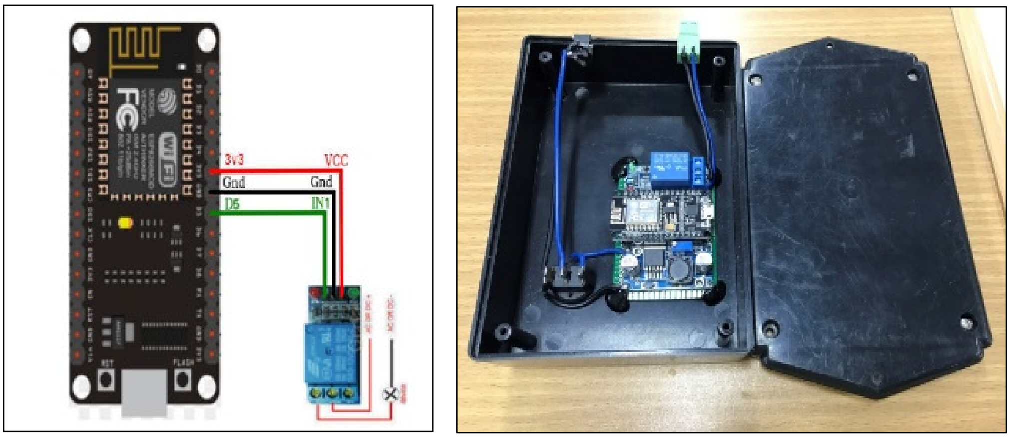


Figure 4 Control circuit board device MCU/ESP8266.

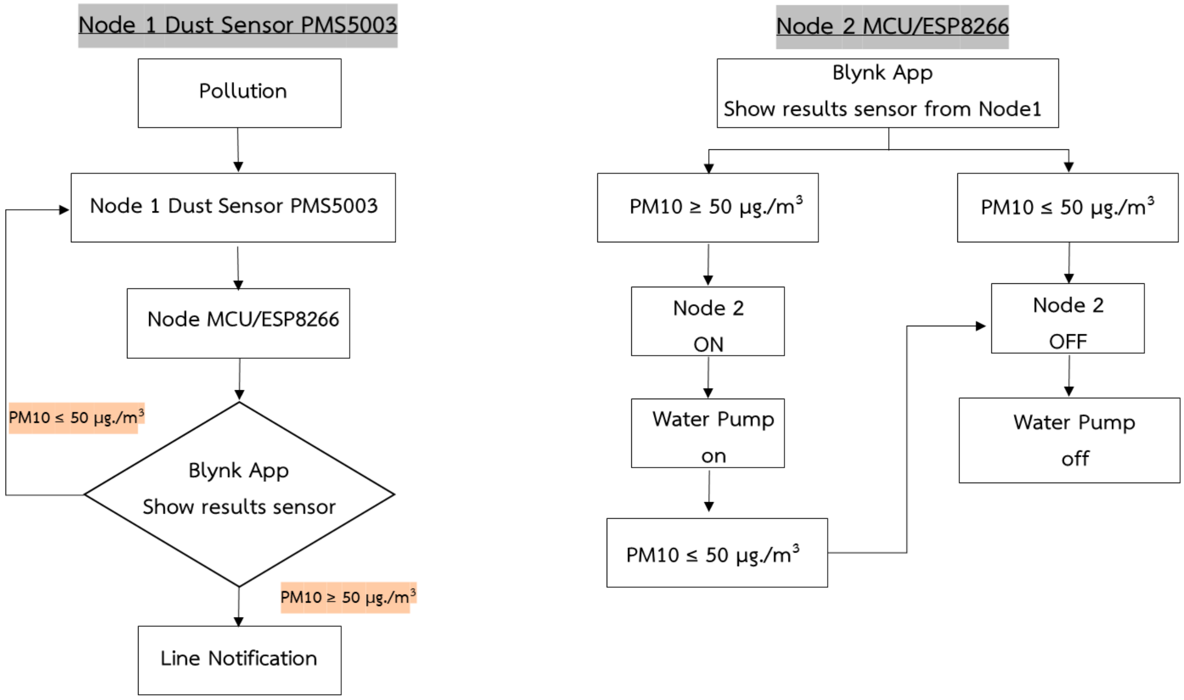


Figure 5 Working diagram of the measuring sensor device PMS5003, and Working diagram of the Control circuit board device MCU/ESP8266.

การทดลองอุปกรณ์

นำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นไปติดตั้งที่จุดศูนย์กลางบริเวณพื้นที่ทดลอง (พื้นที่ทดลองประมาณ 400 ตารางเมตร) ทำการตรวจวัด 2 วัน ซึ่ง ทั้ง 2 วัน มีกิจกรรมที่ต่างกันออกไป โดยในวันแรกมีกิจกรรมงานก่อสร้าง ดังนี้ งานขัดพื้นลานจอดรถยนต์ และในวันที่ 2 มีกิจกรรมงานก่อสร้างดังนี้ งานฉาบผิวคอนกรีต และงานทาสี

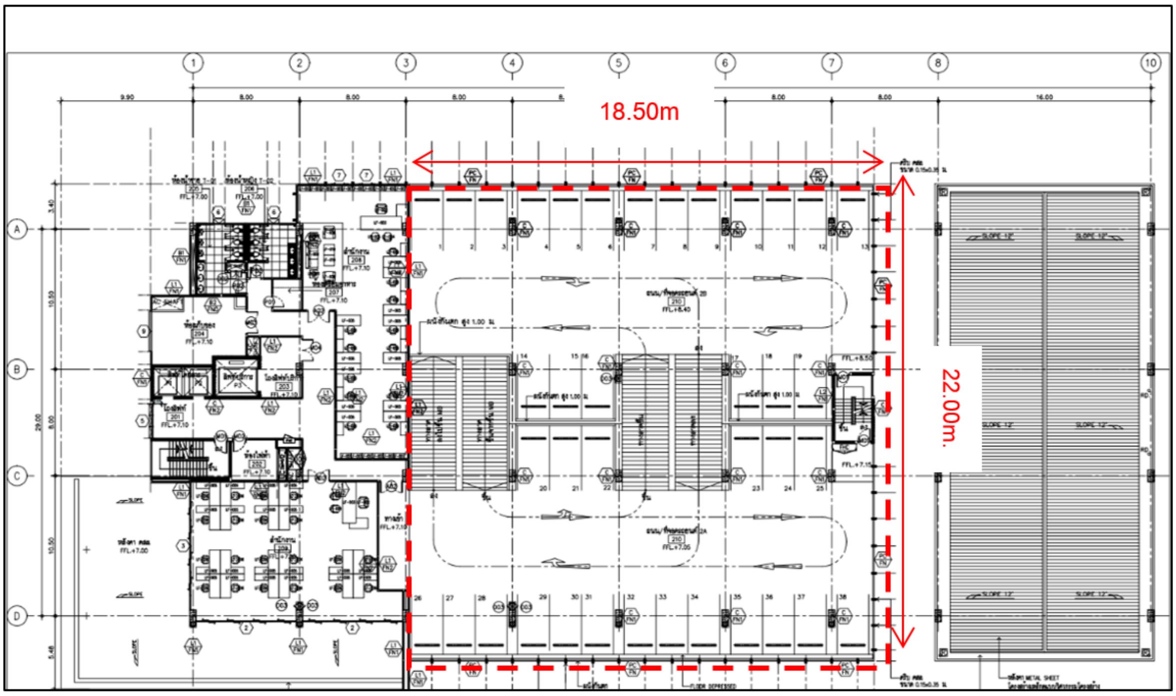


Figure 6 Project area of study.

อุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นจากการทำงานก่อสร้างมีค่าเกินมาตรฐาน PM10 >50 µg./m^3 ข้อมูลจากเซ็นเซอร์จะรายงานเข้ามายังเครื่องมือสื่อสาร (Smart phone) ผ่าน IOT Application BLYNK และแจ้งเตือนผ่าน LINE Application ให้ทราบถึงปริมาณฝุ่นที่เกินค่ามาตรฐานให้ดำเนินการควบคุมฝุ่น โดยการสั่งเปิดน้ำพ่นหมอกเพื่อควบคุมปริมาณฝุ่น ใช้คำสั่งเปิดปั๊มจาก Smart Phone ผ่าน BLYNK Application เพื่อเปิดปั๊มน้ำทำงาน

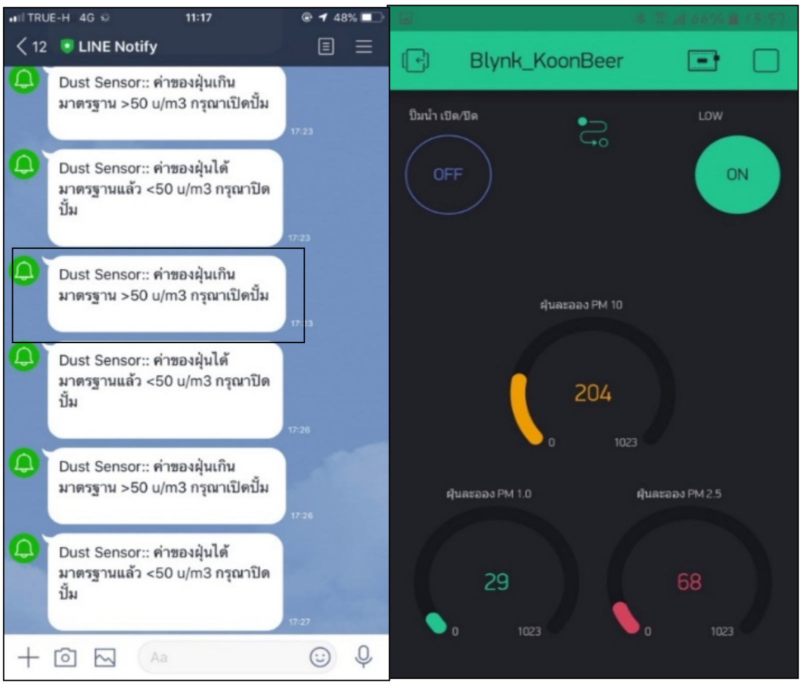


Figure 7 Data on the amount of dust that is exceeded is notified via the IOT network For control of dust.

พ่นน้ำแบบหมอกควบคุมฝุ่นเป็นบริเวณโดยรอบของพื้นที่ ตามแนวท่อที่วางไว้ ในขณะนั้นเซ็นเซอร์ก็ยังคงวัดค่าฝุ่นอยู่ตลอดเวลาจนระยะเวลาผ่านไปค่าฝุ่นมีปริมาณลดลง PM10 <50 µg./m^3 ระบบจะแจ้งเตือนค่าฝุ่นที่ลดลงผ่าน LINE Application กลับเข้ามาอีกครั้ง เมื่อทราบค่าฝุ่นที่ลดลงจึงใช้คำสั่งปิดปั๊มน้ำได้ ทั้งนี้อุปกรณ์เซ็นเซอร์และระบบการควบคุมเปิด/ปิดปั๊ม จะกลับมาทำงานแบบวนซ้ำไปเรื่อยๆ ตามเงื่อนไขที่ได้เขียนเอาไว้

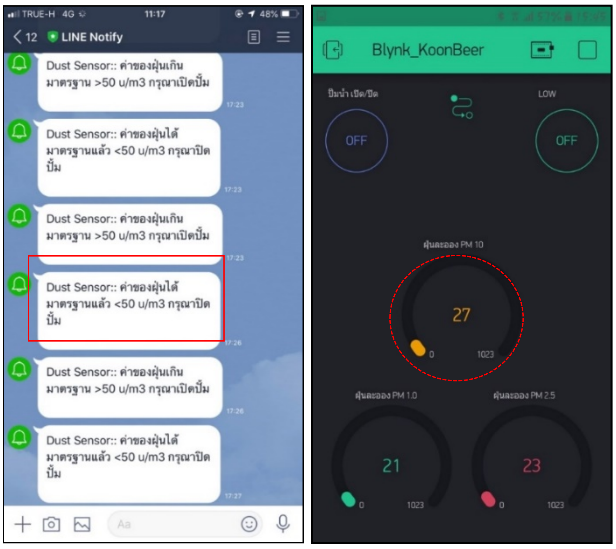


Figure 8 Notification of dust values that are lower than the value set after the control.

ผลการทดลองและวิจารณ์

การประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดเพื่อควบคุมฝุ่นในพื้นที่ก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยี IOT (Internet Of Things) มีผลการทดสอบการใช้งานของอุปกรณ์หลักๆ 3 ข้อ ดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์เซ็นเซอร์จาก Figure 3 ตรวจวัดฝุ่นสามารถส่งข้อมูลได้แบบเวลาจริง แสดงข้อมูลปริมาณฝุ่น PM10 ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต IOT (Figure 7) และส่งแจ้งเตือนข้อมูล ผ่าน LINE Application ให้ทราบถึงปริมาณ PM10 >50 µg./m^3

2. อุปกรณ์บันทึกค่าการวัดฝุ่น สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณฝุ่นและช่วงเวลาที่ตรวจวัด Figure 9 เพื่อแสดงให้เห็นถึงกิจกรรมก่อสร้างในช่วงเวลาที่มีกิจกรรมที่ก่อให้เกิดฝุ่นเป็นจำนวนมาก นั่นคือกิจกรรมงานขัดพื้นลานคอนกรีต ซึ่งจากกราฟจะวิเคราะห์ได้ชัดเจนว่ากิจกรรมถูกเซ็นเซอร์ตรวจวัดได้ค่าปริมาณ PM10 >50 µg./m^3 อยู่ 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 09.10 น. ถึง 09.45 น. ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 54.57 µg./m^3 ช่วงปริมาณฝุ่น PM10 เกินมาตรฐานใช้ระยะเวลาประมาณ 30 นาที ในการควบคุมให้กลับมาอยู่สภาวะปกติ และช่วงเวลา 14.20 น. ถึง 14.45 น. ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 52.25 µg./m^3 ใช้ระยะเวลาประมาณ 20–25 นาที ในการควบคุมปริมาณฝุ่นให้กลับมาอยู่สภาวะปกติ และช่วงเวลา 16.20 น. ถึง 16.45 น. ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 60.00 µg./m^3 ใช้ระยะเวลาประมาณ 20-30 นาที ในการควบคุม ให้กลับมาอยู่สภาวะปกติ และสำหรับปริมาณฝุ่น PM2.5 การรดน้ำแบบหมดก็ช่วยลดปริมาณฝุ่นลงมาเช่นเดียวกัน อย่างเช่น ในเวลา 09.10 น. ถึง 09.45 น.ปริมาณฝุ่น PM2.5 อยู่ที่ 46.15 µg./m^3 ลดลงเหลือ 41.85 µg./m^3 ส่วน PM1.0 เวลาดังกล่าวค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 24.15 µg./m^3

เหลือ 18.45 µg./m^3 ในช่วงเวลาถัดมา 14.20 น. ถึง 14.45 น. ปริมาณฝุ่น PM2.5 อยู่ที่ 20.15 µg./m^3 ลดลงเหลือ 19.85 µg./m^3 ส่วน PM1.0 ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 8.25 µg./m^3 เหลือ 7.55 µg./m^3 และในช่วงเวลา 16.20 น. ถึง 16.45 น.ปริมาณฝุ่น PM2.5 อยู่ที่ 30.15 µg./m^3 ลดลงเหลือ 26.65 µg./m^3 ส่วน PM1.0 ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 13.85 µg./m^3 เหลือ 11.95 µg./m^3

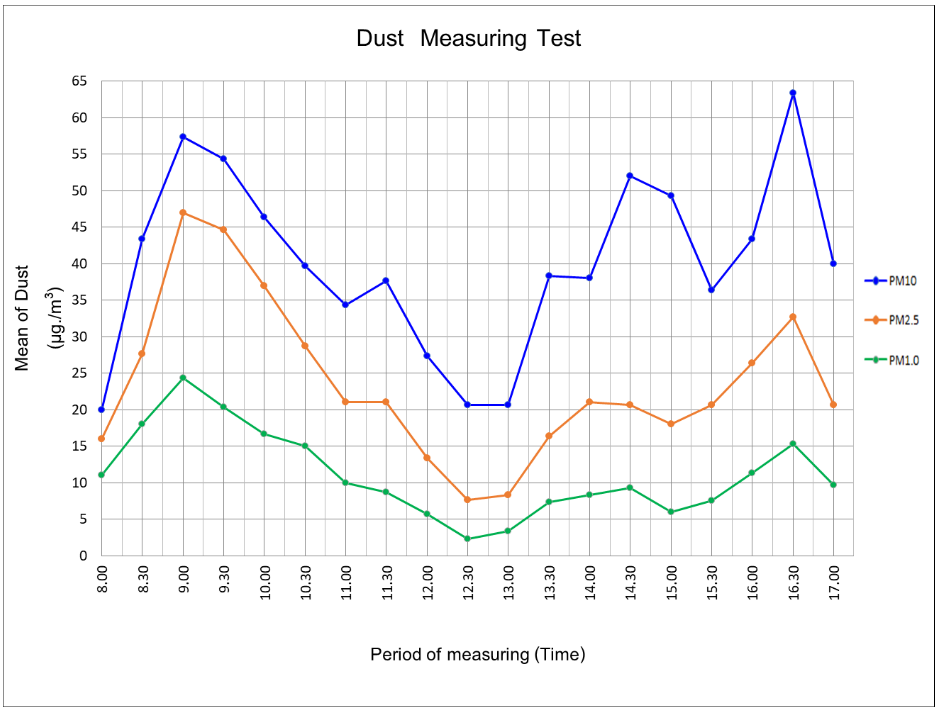


Figure 9 The result of measuring all 3 types of dust on the 1st day of scrubbing floor.

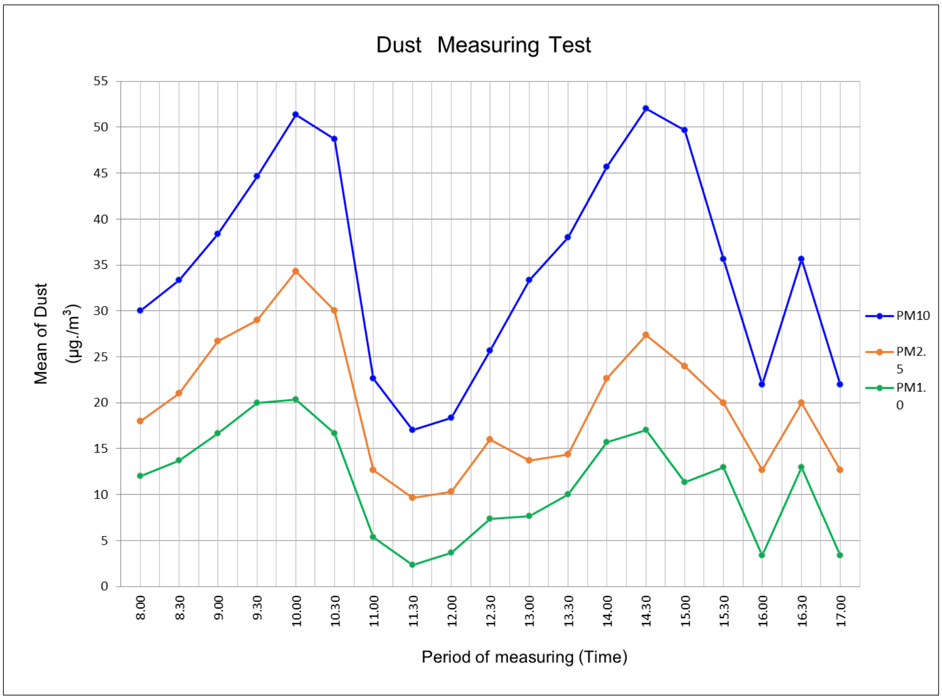


Figure 10 The results of measuring all 3 types of dust on the 2nd day of plastering and painted.

3. จาก Figure 10 ผลการตรวจวัดในวันที่ 2 มีกิจกรรมงานฉาบผิวคอนกรีตและทาสี พบว่าฝุ่นชนิด PM10 มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ในสองช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 10.30 น. ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 51.00 μg./m^3 ปริมาณฝุ่น PM10 เกินมาตรฐานใช้ระยะเวลาประมาณ 20 นาที ในการควบคุมให้กลับมาอยู่สภาวะปกติ และช่วงเวลา 14.20 น. ถึง 15.00 น.ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 51.40 μg./m^3 ช่วงปริมาณฝุ่น PM10 เกินมาตรฐานใช้ระยะเวลาประมาณ 40 นาที ในการควบคุมให้กลับมาอยู่สภาวะปกติ โดยควบคุมระบบรดน้ำแบบหมอก ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 ในช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 10.30 น. ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 38.85 μg./m^3 ลดลงเหลือ 30.05 μg./m^3 ส่วน PM1.0 ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 20.15 μg./m^3 ลดลงเหลือ 17.10 μg./m^3 และในช่วงเวลาที่ 2 เวลา 14.20 น. ถึง 15.00 น. ปริมาณฝุ่น PM2.5 ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 26.00 μg./m^3 ลดลงเหลือ 24.10 μg./m^3 ส่วน PM1.0 ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 16.95 μg./m^3 ลดลงเหลือ 12.25 μg./m^3

สำหรับการทดลองในครั้งนี้ได้ใช้งบประมาณในการทำเครื่องมือตรวจวัดปริมาณฝุ่น และอุปกรณ์สำหรับรดน้ำแบบหมอก ในการช่วยลดปริมาณฝุ่น ซึ่งค่าใช้จ่ายทั้งระบบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Table 1 Summary of cost of dust control systems.

No.	Details	Price/Unit	Number	Amount
1	Dust Sensor PMS5003	900.00	1	900.00
2	Node MCU/ESP8266	500.00	2	1,000.00
3	Relay Module 5 V 2 Channel	70.00	1	70.00
4	Battery lithium 3.7 V 350 mAh Li-polymer	700.00	1	700.00
5	Watering hose	1,500.00	1	1,500.00
6	Water pump 150 watt	4,500.00	1	4,500.00
7	Miscellaneous equipment	1,000.00	1	1,000.00
		Total		9,670.00 Bath

สรุปผล

การตรวจวัดฝุ่นละอองใช้เครื่องมือตรวจวัดเซ็นเซอร์ (Sensor) และการควบคุมปริมาณฝุ่นโดยใช้ระบบรดน้ำแบบหมอก (Spray Fogging) การทดลองการวัดปริมาณฝุ่นในโครงการก่อสร้าง ดำเนินการทดลองในพื้นที่โครงการก่อสร้าง กองบัญชาการตำรวจสอบสวนกลาง ปากเกร็ด นนทบุรี พื้นที่การทดลองอาคารเก็บของกลางขนาด 6 ชั้น โดยทดสอบที่ชั้น 3 ของอาคาร พื้นที่โดยรวมประมาณ 400 ตารางเมตร พบว่าการใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์ (sensor) วัดฝุ่นและการสร้างเครือข่าย IOT ขึ้นมาสำหรับการทดลอง วัดค่าปริมาณฝุ่นและควบคุมปริมาณฝุ่นนั้น

มีผลการทดลองค่อนข้างเป็นที่น่าพอใจ กล่าวคือ อุปกรณ์วัดฝุ่นเซ็นเซอร์ สามารถวัดค่าฝุ่นและส่งผ่านข้อมูลมายัง Application ผ่านการแจ้งเตือนใน LINE Application ให้ทราบค่าปริมาณฝุ่นแบบตามเวลาจริง (Real-Time) โดยใช้เครือข่ายในระบบ 4G สามารถส่งสัญญาณและทำงานได้ไกลสุดในระยะ 30 - 40 เมตร (จากจุดส่งสัญญาณถึงเซ็นเซอร์) และในระยะ 1 – 40 เมตร สามารถส่งข้อมูลได้อย่างราบรื่นอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และแบตเตอรี่ที่ใช้ แบตเตอรี่ ลิเธียม 3.7 V 350 mAh Li-polymer ซึ่งต้องใช้ Step Up Converter Power Supply Board 2V/24V To 5V ในการแปลงไฟให้ได้ 5V สำหรับจ่ายไฟใช้งานร่วมกับ Node MCU/ESP8266 การทำงานกินไฟ <100 mAh และ Dust Sensor PMS5003 การทำงานกินไฟ <100 mAh ซึ่งแบตเตอรี่ มีประจุอยู่ 350 mAh ต้องจ่ายไฟให้ใช้ได้นาน 1.5 ชั่วโมง แต่จากการทดลองพบว่า การใช้งานจริงจะอยู่ราวๆ 2 – 2.30 ชั่วโมง เนื่องจาก ระดับอินเตอร์เฟซ เอาท์พุทแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด(VOL)<0.4V จึงทำให้การใช้ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้นานขึ้นและสามารถควบคุมการสั่งการเปิด/ปิด ปั๊มน้ำเพื่อการควบคุมฝุ่นผ่าน Application ได้ทันทีในกรณีที่ฝุ่นมีค่าเกินมาตรฐาน และการควบคุมปริมาณฝุ่นโดยการพ่นน้ำแบบหมอก สามารถช่วยลดปริมาณฝุ่นจากการทำงานได้ในระดับที่พึงพอใจ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณโครงการกองบัญชาการตำรวจสอบสวนกลาง ปากเกร็ด นนทบุรี ที่อนุญาตให้ใช้พื้นที่ทดลองในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ถิรพิรุฬ์ ทองคำวิฑูรย์. 2559. เทคโนโลยี Internet of Things และข้อเสนอแนะในการบริหารคลื่นความถี่ในประเทศไทย. **วารสาร กสทช. ประจำปี 2559**

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 24 (พ.ศ.2547) **เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป** เล่ม 121 ตอนพิเศษ 104 ง ราชกิจจานุเบกษา วันที่ 22 กันยายน 2547

ประโยชน์ คำสวัสดิ์. 2558. **การพัฒนาเครือข่ายเซนเซอร์สำหรับชลประทานอัตโนมัติ.** รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำนักจัดการคุณภาพและเสียง กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 2547. **ระเบียบและข้อปฏิบัติในการควบคุมฝุ่นละอองจากการก่อสร้างประเภทต่าง ๆ มีนาคม 2547**

Paul Pickering. 2017. Why monitor NO_2 and PM at construction sites? (Online). https://www.aeroqual.com/why-monitor-no2-and-pm-at-construction-sites, July 4, 2019

การปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันสำหรับทางหลวง

Improving Properties of Soil Cement with Palm Oil Fuel Ash for Highway

ชินภพ ชัยมงคล[1*] ก่อโชค จันทวรางกูร[2] และ ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข[2]

Chinaphob Chaimongkol[1*], Korchoke Chantawarangul[2] and Thaweesak Pitikhunpongsuk[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งอย่างเถ้าปาล์มน้ำมันผสมกับดินซีเมนต์เพื่อทำการศึกษาค่ากำลังอัดแกนเดียว และเปรียบเทียบกับมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ และมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง โดยขั้นตอนการทดสอบประกอบไปด้วย การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินเพื่อจำแนกลักษณะของดิน การทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานเพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด และทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียว ซึ่งกำหนดอัตราส่วนจำนวน 7 ชุด รวม 63 ตัวอย่าง และทำการบ่มที่ระยะเวลา 1, 7 และ 28 วัน พบว่าการนำเถ้าปาล์มน้ำมันผสมในดินซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลง แต่การแทนที่ในอัตราส่วนที่เหมาะสมยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ และมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง จึงสรุปได้ว่าการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่เหมาะสมสามารถทดแทนปูนซีเมนต์ในการก่อสร้างถนนชั้นรองพื้นทาง และชั้นพื้นทางได้

ABSTRACT

The objectives of this research are to use waste material like palm oil fuel ash to mix with soil-cement in order to study unconfined compressive strength and to compare with the standard of soil-cement subbase and the standard of soil-cement base of Department of Highways. Test procedures comprise primary property test on engineering of soil to classify soil, modified compaction test to find optimum moisture content at maximum dry density and unconfined compression test. 7 sets of ratio with 63 samples in total are determined and cured at the period of 1, 7 and 28 day (s). It was found that mixing palm oil fuel ash in soil-cement reduced unconfined compressive strength but replacing with appropriate ratio still passed the standard of soil-cement subbase and the standard of soil-cement base of Department of Highways. It was therefore summarized that mixing proper quantity of palm oil fuel ash was able to replace cement for constructing subbase and base.

Key words: palm oil fuel ash, soil-cement, unconfined compressive strength, subbase, base

* Corresponding author; e-mail address: **chinaphop.chaimongkol@hotmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

โครงสร้างพื้นฐานด้านถนนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการยกระดับคุณภาพชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชน ซึ่งปัจจุบันการเติบโตของเมือง และจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นทำให้มีการใช้รถใช้ถนนมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณจราจรบนท้องถนนมีอัตราที่เพิ่มขึ้นทุกปี จำเป็นต้องก่อสร้าง และบูรณะถนนอย่างเสมอ ทั้งนี้การก่อสร้างถนนจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้วัสดุที่ได้มาตรฐานมีความแข็งแรงคงทน โดยเฉพาะชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทางซึ่งถือเป็นชั้นโครงสร้างที่สำคัญ ในปัจจุบันการก่อสร้างโครงสร้างทางดังกล่าวยังคงใช้ต้นทุนที่สูงรวมถึงทรัพยากรที่ใช้ในการก่อสร้างถนนมีอยู่จำกัด และลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งต่อไปอาจเป็นปัญหาส่งผลให้ทรัพยากรเหลือน้อยลงและหมดไปในที่สุด

ในพื้นที่ภาคใต้มีการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจที่หลากหลาย และหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของภาคใต้ก็คือปาล์มน้ำมัน โดยมีเนื้อที่ยืนต้น 4,981,001 ไร่ เนื้อที่ให้ผล 4,396,848 ไร่ ผลผลิต 13,916,081 ตัน และผลผลิตต่อไร่ 3,165 กิโลกรัม (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2561) แสดงให้เห็นว่าปาล์มน้ำมันถือเป็นพืชเศรษฐกิจหลักในพื้นที่ภาคใต้ ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้ประโยชน์จากพืชดังกล่าวประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างชั้นทางของถนน

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากำลังรับน้ำหนักของวัสดุดินซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ และมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง และส่งเสริมให้มีการใช้วัสดุเหลือทิ้งได้อย่างคุ้มค่า

ตรวจเอกสาร

โครงสร้างชั้นทางแบบยืดหยุ่นได้ (Flexible Pavement)

โครงสร้างจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ ตั้งแต่สองชั้นขึ้นไป โดยส่วนบนของถนนบริเวณผิวทางจะมีความเข้มของแรงที่สูงมาก ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้ทำถนนในชั้นผิวทาง และพื้นทางต้องมีคุณสมบัติที่ดี ทนทาน และรับน้ำหนักได้สูง ส่วนที่อยู่ลึกลงไปก็จะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ด้อยลงไปตามลำดับ (จิรพัฒน์, 2557)

กลไกของการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยซีเมนต์

การพัฒนากำลังรับแรงอัดในดินซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยา Cement Hydration เป็นหลัก กล่าวได้ว่าเมื่อซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดสาร CSH CAH และ Calcium Hydroxide ซึ่งสาร CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึด และเกิดการพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ได้ (Moh, 1965)

เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil fuel ash) เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการที่นำกากของผลปาล์มน้ำมัน ซึ่งได้แก่ เส้นใย เศษกะลา และทลายปาล์ม มาทำการเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการเผาไหม้ประมาณ 800 – 900 °C ในส่วนลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่มีการบดหรือที่ได้จากโรงงาน

โดยตรงจะมีลักษณะรูปร่างโดยรวมค่อนข้างหยาบ ความพรุนสูง รูปร่างกลมติดกันเป็นก้อน และไม่มีขนาดที่สม่ำเสมอกัน ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดแล้วจะมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม อนุภาคมีขนาดเล็กลง และความพรุนลดลงเมื่อเทียบจากกรณีที่ไม่ได้ทำการบดมาก่อน (สำเริง และคณะ, 2548)

Figure 1 Palm oil fuel ash.

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ดินลูกรังจากอำเภอเขาพนม จังหวัดกระบี่
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15
3. เถ้าปาล์มน้ำมันจากบริษัทยูนิวานิชน้ำมันปาล์มจำกัด (มหาชน) สาขาปลายพระยา จังหวัดกระบี่
4. น้ำ

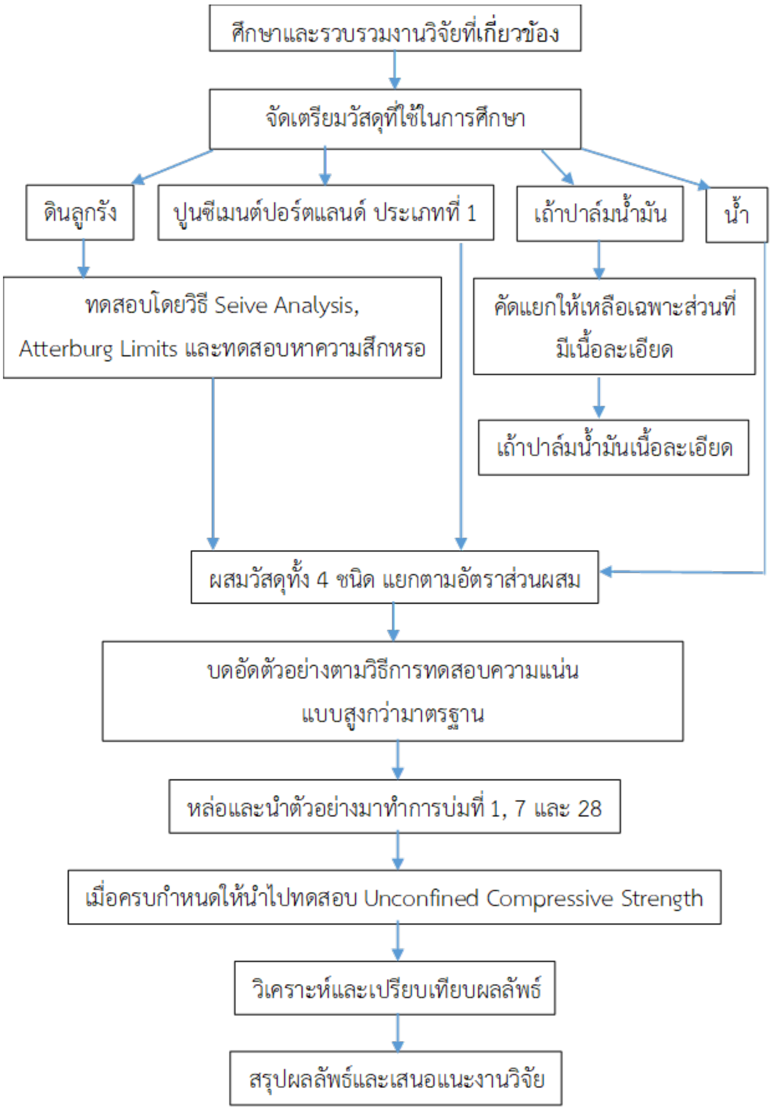
วิธีการศึกษา

การปรับปรุงคุณสมบัติดินซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันสำหรับทางหลวง เป็นการศึกษาโดยนำดินลูกรัง, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1, เถ้าปาล์มน้ำมัน และน้ำ ผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength: UCS) ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของงานถนน ซึ่งสิ่งแรกที่ต้องดำเนินการคือการทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินลูกรัง และในส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันให้ทำการคัดแยกเหลือเฉพาะส่วนที่ละเอียดโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 เพื่อแยกสิ่งเจือปนที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ออกแล้วบดในส่วนที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 ให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 อีกครั้ง จากนั้นทำการผสมวัสดุแยกตามอัตราส่วนแล้วนำตัวอย่างที่ผสมกันแล้วบดอัดโดยวิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งใช้ปริมาณน้ำที่มีความชื้นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด แล้วทำการบ่มตัวอย่างในถุงพลาสติกเป็นเวลา 1, 7 และ 28 วัน (3 ตัวอย่าง : 1 อัตราส่วน) ตามแต่ละตัวอย่างที่ต้องการศึกษา รวมทั้งสิ้น 63 ตัวอย่าง เมื่อครบกำหนดตามการบ่มจึงนำตัวอย่างไปแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างขึ้นมาปล่อยให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง จากนั้นทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength: UCS) พร้อมทั้งหาค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวของแต่ละอัตราส่วน แล้วเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย UCS และอัตราส่วนผสมต่างๆ พร้อมวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษา

Table 1 Weight ratio and 7 sets of samples used for research with 63 samples in total.

Series	Soil : Cement : Palm oil fuel ash
1	100.00 : 0.00 : 0.00
2	100.00 : 2.00 : 0.00
3	100.00 : 1.00 : 1.00
4	100.00 : 0.00 : 2.00
5	100.00 : 4.00 : 0.00
6	100.00 : 2.00 : 2.00
7	100.00 : 0.00 : 4.00

แผนภาพการดำเนินงานวิจัย



ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินลูกรัง

ในการทดสอบหาขนาดของเม็ดวัสดุของดินลูกรังตัวอย่าง พบว่ามีการกระจายของขนาดเม็ดดินดังนี้ (Figure 2)

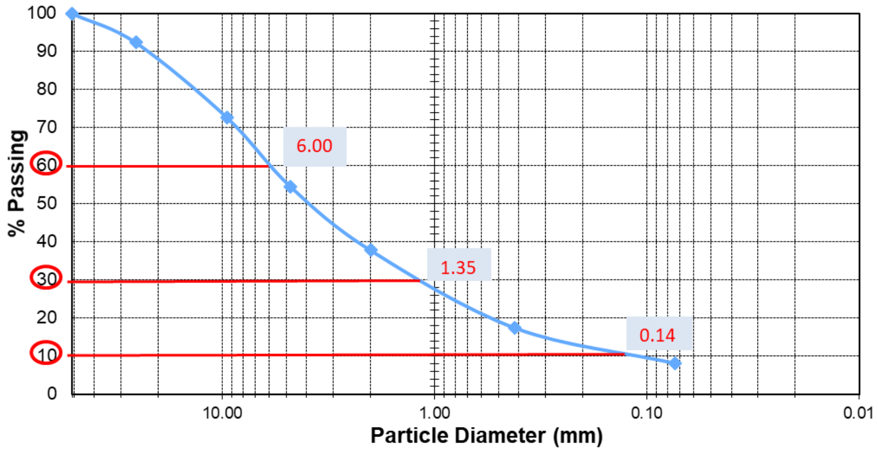


Figure 2 Grain size distribution curve.

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบเพื่อหาขนาดของเม็ดวัสดุ (Sieve Analysis) พบว่าดินมีค่า Coefficient of Uniformity (C_u) และค่า Coefficient of Curvature (C_c) เท่ากับ 42.86 และ 2.17 ตามลำดับ แสดงว่าดินมีขนาดคละกันดี

ในการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว (Liquid Limit: L.L.) และค่าขีดพลาสติก (Plastic Limit: P.L.) ของดินลูกรังตัวอย่างพบว่ามีค่าร้อยละ 35 และร้อยละ 27.6 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคำนวณแล้วจะได้ P.I. มีค่าร้อยละ 7.4

ในการทดสอบเพื่อหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Coarse Aggregates) โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion) พบว่ามีค่าร้อยละ 56.16

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตามระบบ AASHTO พบว่าเป็นดินกลุ่ม A – 2 – 4 (0) ซึ่งเป็นพวกกรวดและทรายปนตะกอนทรายหรือดินเหนียว

ผลการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานเพื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานพบว่าเมื่อมีการนำวัสดุประสานผสมในดินลูกรังโดยการนำเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์จะมีแนวโน้มที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง (Table 2)

Table 2 Summary of relationship value between optimum moisture content and maximum dry density.

Series	Soil : Cement : Palm oil fuel ash	OMC (%)	MDD (gm/cc)
1	100.00 : 0.00 : 0.00	12.5	1.871
2	100.00 : 2.00 : 0.00	12.8	1.873
3	100.00 : 1.00 : 1.00	13.1	1.864
4	100.00 : 0.00 : 2.00	13.1	1.856
5	100.00 : 4.00 : 0.00	13.3	1.845
6	100.00 : 2.00 : 2.00	13.5	1.830
7	100.00 : 0.00 : 4.00	14.1	1.811

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของตัวอย่างทดสอบ

ในการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) จะต้องทำการบ่มตัวอย่างทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนดคือ 1, 7 และ 28 วัน เมื่อได้ระยะเวลาแล้วต้องแช่ก้อนตัวอย่างในน้ำเป็นเวลาสองชั่วโมงแล้วนำขึ้นมาปล่อยทิ้งไว้ให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง จากนั้นเริ่มทำการทดสอบจนครบทุกอัตราส่วน และทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียว และเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยพิจารณาที่วัสดุประสาน 2% และ 4% ตามลำดับ รายละเอียดดังต่อไปนี้ (Figure 3, Figure 4)

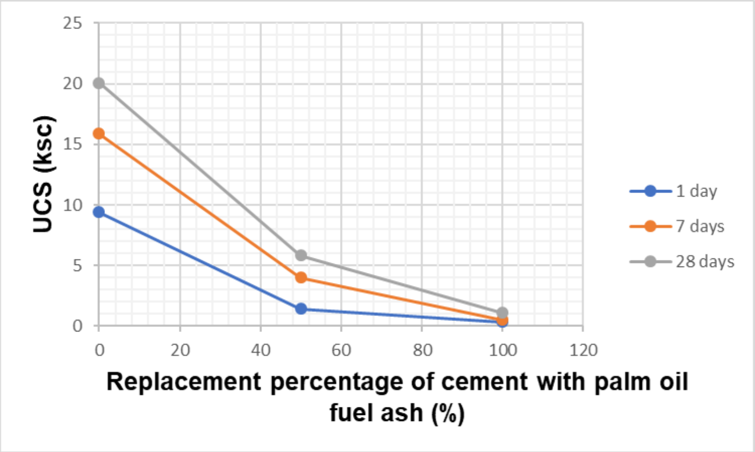


Figure 3 Relationship between unconfined compressive strength and replacement percentage of cement with palm oil fuel ash at different curing ages of 2% of adhesives.

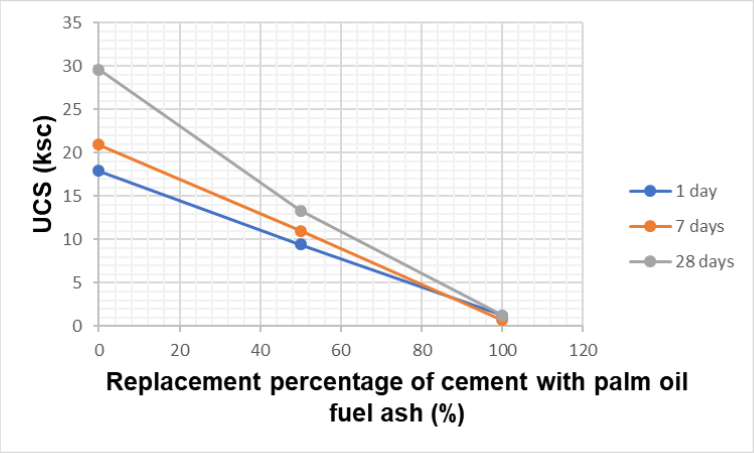


Figure 4 Relationship between unconfined compressive strength and replacement percentage of cement with palm oil fuel ash at different curing ages of 4% of adhesives.

ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มมากขึ้น

สรุป

หากพิจารณาแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียว และเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันของวัสดุประสาน 2% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ช่วงของเส้นกราฟบริเวณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 0 – 35% มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงนั่นคือต้องมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มากกว่า 689 kPa หรือ 7.00 ksc โดยประมาณ และพิจารณาแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียว และเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันของวัสดุประสาน 4% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ช่วงของเส้นกราฟบริเวณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 0 – 15% มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงนั่นคือต้องมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มากกว่า 1,724 kPa หรือ 17.50 ksc โดยประมาณ ขณะที่แนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียว และเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันของวัสดุประสาน 4% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ช่วงของเส้นกราฟบริเวณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 0 – 68% มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงเช่นกัน ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่าการนำเถ้าปาล์มน้ำมันผสมในดินซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าลดลง แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในบางอัตราส่วน ยังคงมีค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ และมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทวรางกูร นายปฐวี สังข์น้อย นายศุภโชค สุวรรณจำรูญ นายปรเมษฐ หอมหวล และนายธนโชติ รอดเสวก ที่คอยให้คำปรึกษาตลอดจนช่วยเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหาทำให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. 2532. **มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์** (Soil Cement Subbase). กรมทางหลวง กระทรวงคมมนาคม, กรุงเทพฯ.

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. 2556. **มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์** (Soil Cement Base). กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

จิรพัฒน์ โชติกไกร. 2557. **วิศวกรรมการทาง.** พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2562. **สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2561.** สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

สำเริง รักซ้อน, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สมชาย ชูชีพสกุล และปริญญา จินดาประเสริฐ. 2548. การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา** 16 (2): 38-43.

Moh, Z.C. 1965. Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals. Highway Research Record 86 : 39-61.

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังคุณภาพต่ำโดยตะกรันเตาหลอมเหล็กและปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง

Improvement of Low Quality Lateritic Soil using Steel Furnace Slag and Portland Cement for use as Highway Materials

อภิชาติ วงษา [1] ศุภกิจ นนทนานันท์[1] สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว[1] อัครชัย เรืองแสงทอง [1]

Apichart Wongsa [1], Supakij Nontananandh [1], Susit Chaiprakaikeow [1] and Akkarachai Ruangsangthong [1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยใช้ตะกรันเตาหลอมเหล็กและปูนซีเมนต์ ดินลูกรังที่มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับใช้เป็นวัสดุงานทางสามารถปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นโดยผสมดินลูกรังกับตะกรันเตาหลอมเหล็กที่บดละเอียดในอัตราส่วน 75:25 และผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนักแห้ง หลังจากปรับปรุงคุณภาพพบว่าดินซีเมนต์มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม จากการวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) พบว่าปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Calcium Silicate Hydrate (CSH) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ Tricalcium silicate (C_3S) มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ตัวอย่างดินที่ใช้ตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียดผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 4% มีการพัฒนากำลังเป็นไปตามข้อกำหนด สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง และที่อัตราส่วน 6% และ 8% สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้

ABSTRACT

This research aims to study a quality improvement of lateritic soil using furnace slag and cement. The lateritic soil that does not meet the standard requirements of highway materials can be improved by mixing with ground furnace slag at the ratio of 75:25, which were then mixed with cement at 4, 6 and 8 percent by dry weight. After the improvement, the results showed that the compressive strength of soil cement increased with increasing of the amount of the cement binder and curing time. The results of X-ray diffraction (XRD) indicated that the amount of Calcium Silicate Hydrate (CSH) increased while Tricalcium Silicate (C_3S) decreased conforming with the results of the unconfined compressive strength test. The soil mixed with ground furnace slag and 4% cement had sufficient strength development to meet the standard requirement and was able to be used as soil cement subbase material while the ones mixed with 6% and 8% of cement were able to be used as soil cement base material.

Keyword: soil improvement, soil cement, steel furnace slag, X-ray diffraction analysis (XRD), Calcium Silicate Hydrate

* Corresponding author; e-mail address: Apichart.Wongs@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

คำนำ

โครงสร้างทางประกอบไปด้วยชั้นวัสดุหลายชั้น เช่น ชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นผิวทาง โดยจะต้องมีการคัดเลือกวัสดุที่มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ในบางพื้นที่อาจพบข้อจำกัดด้านปริมาณหรือคุณภาพของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้าง ปัจจุบันมีการตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงทำให้การแสวงหาแหล่งวัสดุใหม่ที่มีคุณภาพดีเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างนั้นทำได้ยากยิ่งขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังภายในท้องถิ่นบริเวณที่ทำการก่อสร้างเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบรรเทาปัญหาการขาดแคลนวัสดุเพื่อใช้ในการก่อสร้างได้

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการทางเคมีเป็นแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีคุณภาพไม่เป็นไปตามมาตรฐานมาปรับปรุงเพื่อใช้ในการก่อสร้าง โดยคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ นักวิจัยทั้งในประเทศไทยและในต่างประเทศจึงได้ทำการศึกษาวิจัย เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังที่ด้อยคุณภาพโดยการใช้สารเชื่อมประสาน เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาผสมดินลูกรัง ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัสดุมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีในระยะเวลาอันสั้น นอกจากนี้นักวิจัยยังมีแนวความคิดที่จะนำกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ (Rice hush ash) เถ้าลอย (Fly ash) ผงฝุ่นซีเมนต์ (Cement kiln dust) และตะกรันเหล็ก (Steel Furnace slag) มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ซึ่งผลการวิจัยพบว่าสามารถปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของดินอ่อนได้ (ธีระชาติ, 2539 ; Naphol *et al.* 2017)

ตะกรันเตาหลอมเหล็ก (Steel Furnace slag) เป็นกากของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้จากกระบวนการผลิตเหล็กกล้าและเหล็กรูปพรรณ ปริมาณตะกรันเตาหลอมเหล็กในประเทศไทยนั้นมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นในทุก ๆ ปี ซึ่งการกำจัดกากโรงงานอุตสาหกรรมนี้ ต้องนำไปฝังกลบและมีค่าใช้จ่ายประมาณ 1,200 บาทต่อตัน หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 0.75 เท่าของราคาเหล็ก (ประกฤต, 2542) ตะกรันเตาหลอมเหล็กจะประกอบด้วยกลุ่มซิลิกอนไดออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และเหล็กออกไซด์ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับปูนซีเมนต์ แต่ปริมาณจะแตกต่างกันไปตามแต่ละแหล่งผลิต จึงมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอสโซลาน (สรายุทธ, 2548)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังด้อยคุณภาพสำหรับใช้เป็นวัสดุงานทาง โดยใช้ตะกรันเตาหลอมเหล็กทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 นำมาเป็นสารเชื่อมประสานในการปรับปรุงคุณภาพดินให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานและข้อกำหนดของงานก่อสร้างถนน เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุในงานชั้นรองพื้นทางหรืองานชั้นพื้นทาง โดยจะทำการศึกษาถึงอัตราส่วนผสมของสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม ตลอดจนคุณสมบัติด้านวิศวกรรมที่สำคัญได้แก่ กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) งานวิจัยนี้วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบหลักตั้งต้น Tricalcium silicate (C_3S) และสารผลิตภัณฑ์หลัก Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometers, XRD) ซึ่งจะสามารถอธิบายกลไกของการพัฒนากำลังของดินที่ปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมตะกรันเตาหลอมเหล็ก ดังนั้น แนวคิดในการนำตะกรันเตาหลอมเหล็กมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อใช้ปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง

ด้อยคุณภาพ นอกจากจะทำให้เกิดแหล่งวัสดุก่อสร้างทางเลือกใหม่แล้ว ยังมีส่วนช่วยในการรักษาสภาพสิ่งแวดล้อมจากการจัดการนำขยะอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

ดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างจากบ่อยืมดินในพื้นที่ อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี ที่ระดับความลึก 1-3 ม. จากผิวดิน ผลการทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการพบว่ามีปริมาณความชื้นในธรรมชาติ 16.1% ขีดจำกัดเหลว 40.53% ขีดจำกัดพลาสติก 22.41% ดัชนีพลาสติก 18.22% ความถ่วงจำเพาะ 2.76 ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) 1.94 t./m^2 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (W_{opt}) 14.0 % โดยการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดินลูกรังนี้อยู่ในกลุ่มทรายปนดินเหนียว (SC) เมื่อจำแนกดินตามระบบ Unifined soil classification system (USCS) เป็นดินเม็ดหยาบและมีความเหนียวสูง โดยมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียว 1.9-3.0 ksc. เมื่อพิจารณาเกณฑ์สำหรับนำดินไปใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง ดินลูกรังดังกล่าวมีคุณสมบัติอยู่ในขอบเขตล่างของข้อกำหนดจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

ตะกรันเตาหลอมเหล็ก (Steel Furnace slag) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กชนิดเตาหลอมไฟฟ้า (Electronic arch furnace slag หรือ EAF Slag) มีลักษณะเป็นผลึกก้อนแข็งและมีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 1-5 ซม. ถูกบดให้มีความละเอียดเทียบเคียงกับมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland cement, OPC) จากการทดสอบด้วยวิธี Air blaine permeability พบว่ามีค่าความละเอียดเฉลี่ย 2,800 cm^2/g องค์ประกอบทางเคมีของผงตะกรันเหล็กบดใน Table 1 พบว่ามีปริมาณผลรวมของซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 เมื่อจำแนกประเภทวัสดุปอซโซลานจะจัดได้ว่าเป็นสารในชั้นคุณภาพ (Class) F ตามมาตรฐาน ASTM C 618

Table 1 Chemical compositions of steel furnace slag.

Composition	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
%	59.96	12.97	17.07	1.41	0.13	1.60	0.40	0.35

Table 2 Symbol of mix proportion test.

Symbol	SSC4	SSC6	SSC8
Cement content (% by weight of soil mixed with slag)	4	6	8

วิธีการและขั้นตอนการวิจัย

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังกระทำโดยนำตะกรันเตาหลอมเหล็กที่ผ่านการบดละเอียดมผสมเข้ากับดินลูกรังที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ผ่านเท่ากับ 58 % ในอัตราส่วนน้ำหนักแห้งของดินลูกรังต่อตะกรันเตาหลอมเหล็กบด 75:25 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ได้จากการทดลองหาส่วนผสมที่เหมาะสมในห้องปฏิบัติการในการทดสอบเบื้องต้น (Preliminaly test) และให้กำลังอัดสูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่าที่เสนอโดย Sekhar *et al.* (2017) จากนั้นจึงผสมด้วยปูนซีเมนต์ในปริมาณดังแสดงใน Table 2 โดยใช้ปริมาณน้ำที่ค่า W_{opt} เมื่อส่วนผสมของดินซีเมนต์ทั้งหมดเข้ากันดีแล้วจึงทำการบดอัดในแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว โดยควบคุมพลังงานในการบดอัดให้เทียบเท่ากับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) จากนั้นนำตัวอย่างดินซีเมนต์ออกจากแบบหล่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติก Plastic wrap และบรรจุในกล่องพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น เมื่อครบอายุการบ่มที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน นำตัวอย่างดินซีเมนต์แช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการวิเคราะห์ค่าความเร็วคลื่นเฉือนในตัวอย่างโดยวิธี Free-Free Resonance (FFR) และทดสอบกำลังรับแรงอัด (Unconfined compressive strength, q_u) ภายหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ที่บริเวณระนาบที่ดินพังทลายเพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารตั้งต้น Tricalcium Silicate (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลัก (Bouque's compounds) ในปูนซีเมนต์และสารผลิตภัณฑ์ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่อายุการบ่มต่างๆ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ส่องกราดตัวอย่างที่มุม 2θ ในช่วง 5 - 90 องศา เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น สารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับกำลังที่เพิ่มขึ้น เพื่อใช้อธิบายกลไกปฏิกิริยาการพัฒนากำลัง

อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริงในสนามจะต้องพิจารณาปรับแก้ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมเพื่อทำปฏิกิริยาเนื่องจากอิทธิพลของเม็ดดินที่มีขนาดโตกว่าตะแกรงเบอร์ 4 ที่คัดทิ้งไป ตามที่เสนอโดย Hausmann (1990)

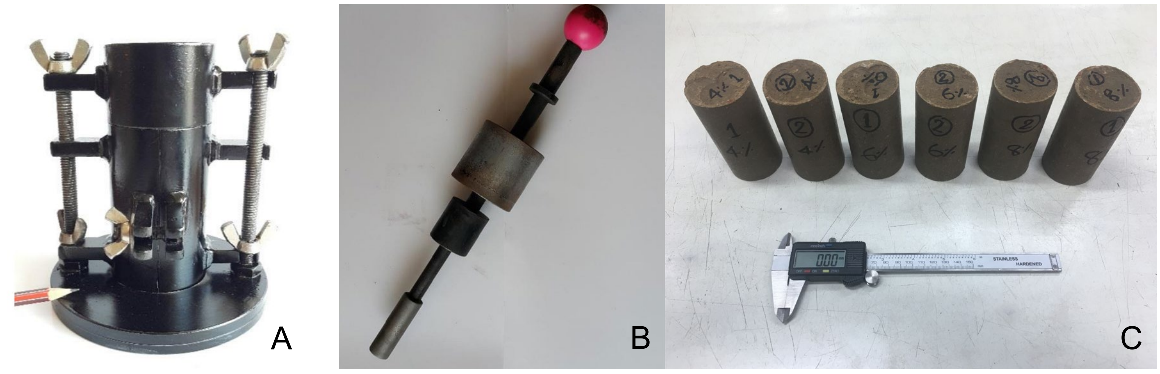


Figure 1 Sample preparation equipment (A) mold, (B) rammer, (C) soil samples.

ผลการทดลองและวิจารณ์

การพัฒนากำลังของดินผสมสารเพิ่มเสถียรภาพ

Figure 2 แสดง Stress-Strain ของดินลูกรังก่อนการปรับปรุง ดินลูกรังผสมตะกรันเตาหลอมเหล็กและที่ผสมปูนซีเมนต์ตามลำดับ พบว่ากำลังรับแรงอัดของดินลูกรัง (q_u) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก 4.25 ksc เป็น 10.10 ksc โดย Strain ที่ failure (ε_f) ลดลงจาก 8.14% เป็น 5.93% และเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ 4%, 6% และ 8% พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain มีความชัน (Peak Stress) เพิ่มขึ้นชัดเจน และมี ε_f ลดลงอยู่ในช่วง 2.5-3 % แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ที่ผสมในปริมาณที่เหมาะสมมีผลต่อการพัฒนากำลัง

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินลูกรังที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยตะกรันเตาหลอมเหล็กและผสมปูนซีเมนต์ใน Figure 3 พบว่าดินซีเมนต์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัด (q_u) ตามอายุการบ่มและปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ในช่วงอายุการบ่มสองสัปดาห์แรก (1, 3, 7 และ 14 วัน) q_u มีการพัฒนากำลังอยู่ในช่วง 13 – 36 ksc โดย q_u เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงอายุการบ่มหลัง 14 วัน ที่สัดส่วนผสม 4%, 6% และ 8% ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 64.0, 89.34 และ 115.04 ksc ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดเปรียบเทียบกับมาตรฐานวัสดุงานทางดินซีเมนต์กรมทางหลวงพบว่าตัวอย่างดินที่ใช้ตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียดผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 4% และบดอัดโดยใช้พลังงานเทียบเท่า Modified Compaction มีกำลังเป็นไปตามข้อกำหนด สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง และที่อัตราส่วน 6% และ 8% สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้

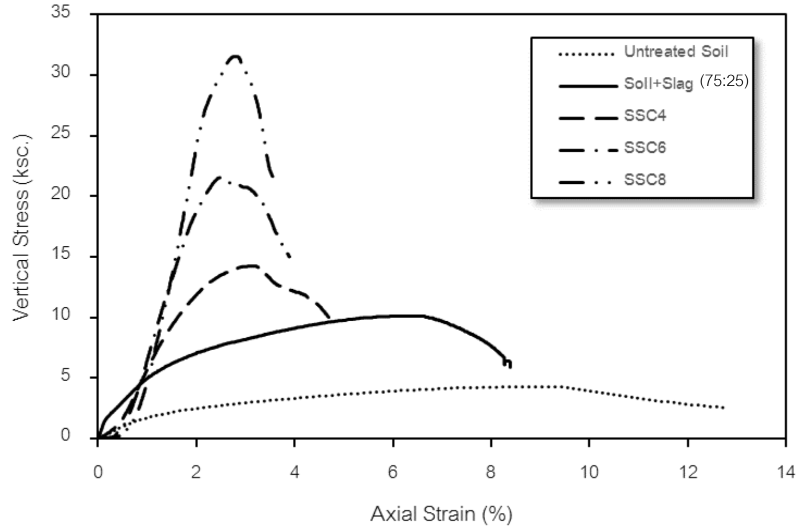


Figure 2 Stress – Strain characteristic curve of untreated soil compared with slag and cement stabilized soil after 6 days curing and 2 hrs. soaking before UCS test.

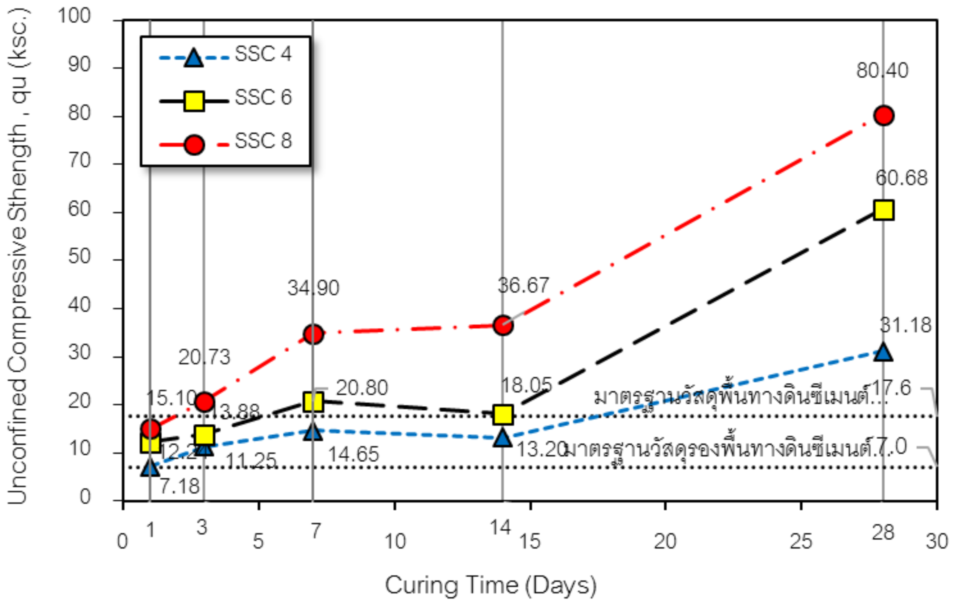
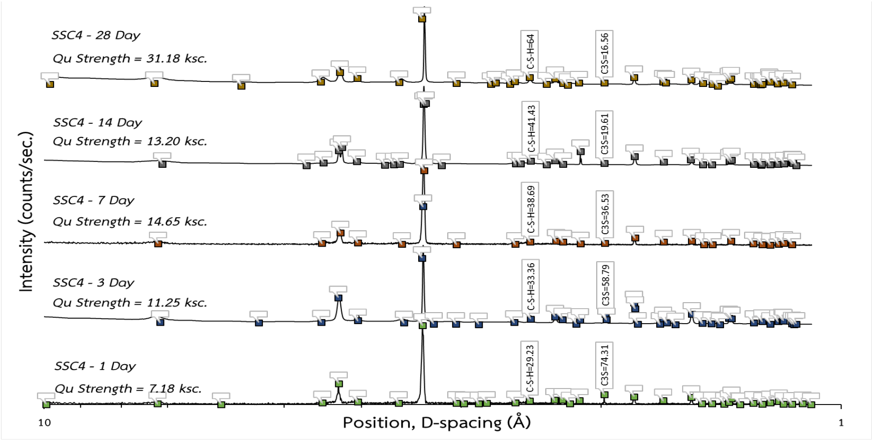


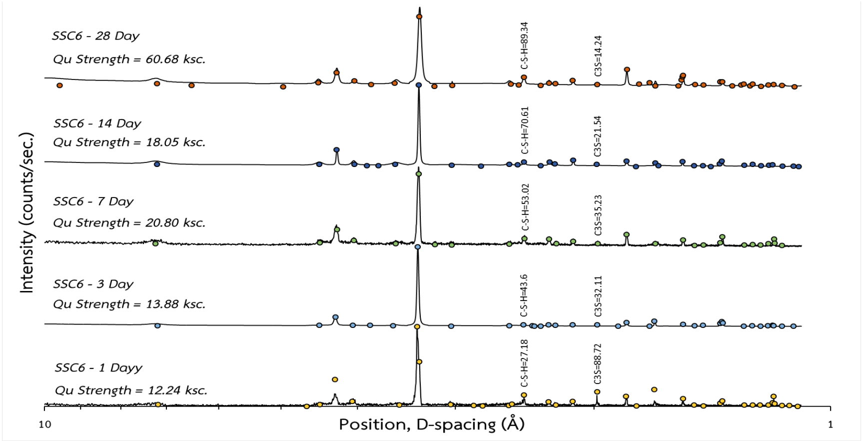
Figure 3 Unconfined compressive strength and curing time.

ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบหลักตั้งต้นและการพัฒนากำลังของสารผลิตภัณฑ์หลัก

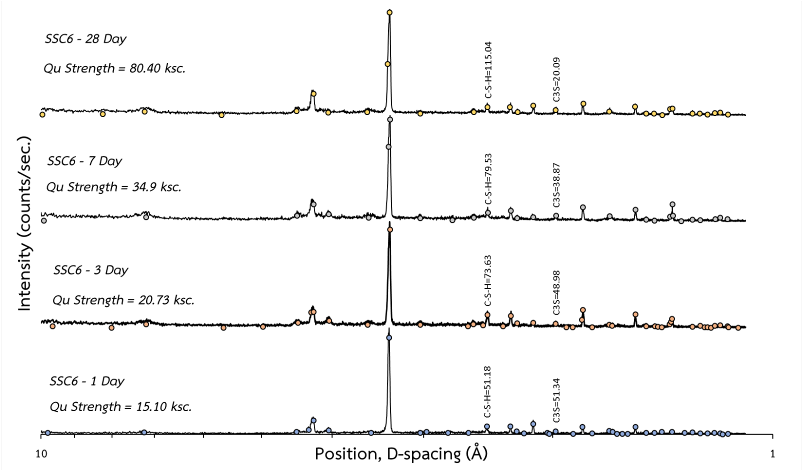
ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของดินซีเมนต์ในส่วนผสม SSC4, SSC6 และ SSC8 ในแต่ละอายุการบ่มตั้งแต่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงใน Figure 4 (a) - Figure 4 (c) และ Table 3 พบว่าปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ที่ตำแหน่ง d-spacing เท่ากับ 1.98 Å มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมมากขึ้น โดยสอดคล้องกับการลดลงของสารประกอบหลักตั้งต้น C_3S ที่ตำแหน่ง d-spacing เท่ากับ 2.45 Å



(a)



(b)



(c)

Figure 4 Typical XRD pattern of soil slag mix with cement 4,% 6% and 8% at different curing time.

Table 3 C_3S and CSH formation for all mixture and curing times.

Mixture	C_3S at curing (days) / Counts per sec.					CSH at curing (days) / Counts per sec.				
	1	3	7	14	28	1	3	7	14	28
SSC4	74.31	58.79	36.53	19.61	16.56	27.18	33.36	38.69	41.43	64.00
SSC6	88.72	32.11	35.23	21.54	14.24	29.23	43.46	53.03	70.61	89.34
SSC8	51.34	48.98	38.87	N.A.	20.09	51.81	73.63	79.53	N.A.	115.04

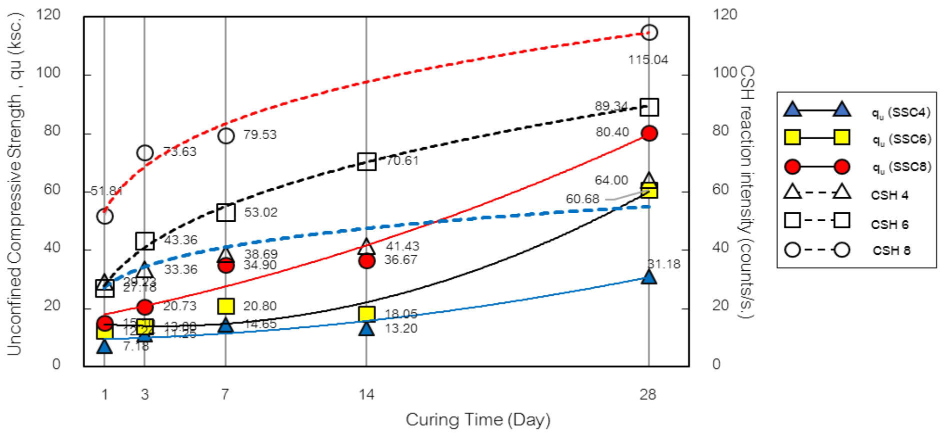


Figure 5 Comparisons between strength development in relation to CSH for SSC4, SSC6 and SSC8.

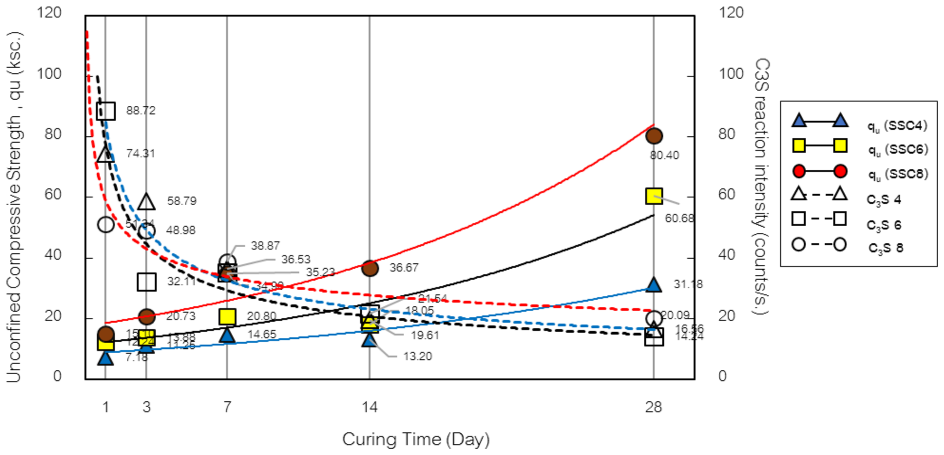


Figure 6 Comparisons between strength development in relation to C_3S for SSC4, SSC6 and SSC8.

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ของดินซีเมนต์ทุกสัดส่วนผสมที่อายุการบ่มต่างๆ ดังแสดงใน Figure 5 พบว่าปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH จะเพิ่มสูงขึ้นตาม q_u ของดินซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เสนอโดย Naphol *et. al.* (2017) ทั้งนี้ ในการศึกษานี้พบว่าการเกิด CSH ในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยา (สองสัปดาห์แรก) จะมีอัตราสูงกว่าอัตราการเกิดในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักตั้งต้น กล่าวคือ C_3S มีอัตราการลดลงอย่างชัดเจนในช่วง 7 วันแรก หลังจากนั้น C_3S จะคงเหลืออยู่ในดินซีเมนต์ในปริมาณที่น้อยลงมาก เป็นผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในระยะยาวในอัตราที่ลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบหลักตั้งต้น C_3S ของดินซีเมนต์ทุกสัดส่วนผสมที่อายุการบ่มต่างๆ สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนใน Figure 6 โดยแนวโน้มของอัตราการลดลงของ C_3S (ΔC_3S) สอดคล้องกับงานวิจัยที่เสนอโดย Kamon และ Nontananandh (1990)

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นกำลังของดินซีเมนต์กับอัตราการเกิดสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ที่ทุกสัดส่วนผสมที่อายุการบ่มต่างๆ พบว่าในช่วงต้นของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดินซีเมนต์จะพัฒนากำลังในอัตราที่น้อยกว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังอายุการบ่มหลัง 14 วัน ทั้งนี้คาดว่าน่าจะเกิดจากการพัฒนาของโครงสร้างผลึกของสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH เชื่อมประสานกับอนุภาคดินและเปลี่ยนจากสภาพกึ่งของแข็งมีลักษณะคล้ายเจล (Gelateneous

phase) ในช่วงต้น ค่อยๆแข็งตัวเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม (Hardening phase) และกลายเป็นโครงสร้างของดินซีเมนต์ที่มีความแข็งเพิ่มมากขึ้นในระยะยาว (Hardened phase) ตามที่เสนอโดย Kamon และ Nontananandh (1990)

สรุป

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และตะกรันเตาหลอมเหล็กเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยการใช้กากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยพบว่าดินผสมตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียดที่อัตราส่วน 75:25 และผสมปูนซีเมนต์ ในอัตราร้อยละ 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนักเป็นสัดส่วนผสมที่เหมาะสม ตัวอย่างดินที่ใช้ตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียดผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 4% มีการพัฒนากำลังเป็นไปตามข้อกำหนด สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางและที่อัตราส่วน 6% และ 8% สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้ ผลจากการวิเคราะห์ X-ray diffraction analysis พบว่าปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่เกิดขึ้นและการทำปฏิกิริยาของสารประกอบหลักตั้งต้น Tricalcium Silicate (C_3S) มีความสัมพันธ์และสอดคล้องกับการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการอนุเคราะห์อุดหนุนเงินทุนวิจัยในการศึกษาครั้งนี้ และศูนย์นวัตกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ X-ray diffraction analysis (XRD)

เอกสารอ้างอิง

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์. 2539. **การปรับปรุงคุณภาพวัสดุและปัญหาในประเทศไทย**, เอกสารการปรับปรุงคุณภาพดินโดยผสมซีเมนต์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบรี, กรุงเทพฯ.

ประกฤต ฉัตรแสงอุทัย. 2542. **การทำเสถียรกากตะกรันจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ/หรือ ปูนขาว**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

สรายุทธ แก้วนำ. 2548. **การศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าหนักและตะกรันเหล็กมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Darshan, C.S., N. Sitaram and H.K. Preetham. 2017. **Influence of Granulated Blast Furnace Slag and Cement on the Strength Properties of Lithomargic Clay**. Indian Geotechnical Journal. 47. 10.1007/s40098-017-0228-8.

Jawed, L., J. Skalny and J.F. Young. 1983. **Hydration of Portland Cement. Structure and Performance of Cement**, P. Barnes Ed., Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York.

Kamon, M. and S. Nontananandh. 1990. **Contribution of stainless-steel slag to the developement of strength for seabed hedoro.** Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 30 (4): 63-72.

Yoobanpot,N., P. Jamsawang and S. Horpibulsuk. 2017. Strength behavior and microstructural characteristics of soft clay stabilized with cement kiln dust and fly ash residue, **Applied Clay Science** 141: 146-156.

Hausmann, M.R. 1990. **Engineering principle of ground modification,** page 44-46, ISBN 0-07027279-4.

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจในการใช้บริการคาร์แชริ่งในกรุงเทพมหานคร

Factors Affecting Consumer Intention to Use Carsharing Service in Bangkok

กรกฎ จันทร์ยวง[1*] สโรช บุญศิริพันธ์[1] และ วิโรจน์ รุโจปการ[1]

Korakot Chanyuang[1*], Saroch Boonsiripant[1] and Wiroj Rujopakarn[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อความตั้งใจในการใช้บริการคาร์แชริ่งในกรุงเทพมหานคร และพัฒนาแบบจำลองสมการโครงสร้างปัจจัยที่มีผลต่อความตั้งใจที่จะใช้บริการคาร์แชริ่ง โดยเก็บข้อมูลผ่านแบบสอบถามบริเวณใกล้เคียงของสถานีให้บริการคาร์แชริ่งในกรุงเทพมหานคร จากบุคคลทั่วไปที่มีอายุ 18 ปีขึ้นไป จำนวน 600 ตัวอย่าง การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน และการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะใช้บริการคาร์แชริ่ง คือ ปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่าย ปัจจัยด้านคุณค่าต่อสังคม ปัจจัยด้านการรับรู้ถึงบริการ และปัจจัยด้านความสะดวกสบาย โดยปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่ายมีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะใช้บริการมากที่สุด

ABSTRACT

The objective of this research is to determine factors affecting the intention to use carsharing service in Bangkok using the structural equation modeling technique. The data were collected through questionnaires nearby four carsharing stations in Bangkok. The total of 600 respondents ages ranged from 18 to 60 years old participated in the questionnaire survey. This research applied exploratory factor analysis (EFA), confirmatory factor analysis (CFA), and structural equation model (SEM) technique as the analysis tools. The results showed that factors affecting the intention to use carsharing include cost saving, social value, awareness, and convenience. The study revealed that cost saving was the most influential factor for consumer's intention to use carsharing in Bangkok.

Key words: car sharing, intention to use, exploratory factor analysis (EFA), confirmatory factor analysis (CFA), structural equation model (SEM)

* Corresponding author; email address: korakotjunyuang@gmail.com

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10400

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10400

คำนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านการจราจรติดขัดเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศไทยเนื่องจากประชากรในประเทศไทยมีการซื้อรถยนต์ส่วนบุคคลมากขึ้นทำให้มีปริมาณรถยนต์ส่วนบุคคลเพิ่มมากขึ้นทุกปี ดังนั้นเราควรส่งเสริมให้ลดปริมาณการครอบครองรถยนต์ส่วนบุคคล (Car Ownership) และส่งเสริมการใช้ระบบขนส่งสาธารณะมากขึ้น ซึ่งการใช้ระบบขนส่งมวลชนเป็นวิธีที่จะช่วยแก้ไขปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผังเมืองกรุงเทพฯ ไม่ได้ถูกวางแผนมาไว้อย่างเป็นระบบ ส่งผลให้ระบบขนส่งมวลชนไม่สามารถเข้าถึงได้ในทุกพื้นที่ ดังนั้น ผู้เดินทางในกรุงเทพฯ ยังต้องพึ่งพาระบบขนส่งสาธารณะทางเลือกอื่น เช่น รถแท็กซี่ (Taxi), จักรยานยนต์รับจ้าง เป็นต้น และอีกหนึ่งทางเลือก คือ การใช้คาร์แชริ่ง (Carsharing) ซึ่งคาร์แชริ่งคือรถยนต์ให้เช่ารูปแบบนึงซึ่งแตกต่างจากรถยนต์ให้เช่าทั่วไปตรงที่สามารถเช่าเป็นระยะเวลาอันสั้น เช่น เช่าเป็นรายชั่วโมง หรือเช่าเป็นรายนาที โดยการสมัคร การจองรถ การเลือกชนิดรถ และการปลดล๊อคเข้าใช้รถทำผ่านแอปพลิเคชั่นในโทรศัพท์มือถือ ข้อดีของการใช้บริการคาร์แชริ่งคือ มีความสะดวกสบายในการเดินทาง และมีความหยืดหยุ่นในการเดินทาง ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของรถยนต์ส่วนบุคคล และสามารถใช้บริการได้ตลอด 24 ชั่วโมง แต่มีข้อจำกัดตรงที่ผู้ใช้บริการต้องสามารถขับรถยนต์ได้ สำหรับประเทศไทยคาร์แชริ่งยังเป็นรูปแบบการให้บริการรูปแบบใหม่ นำมาสู่วัตถุประสงค์ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ การศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจในการใช้บริการคาร์แชริ่งในกรุงเทพมหานคร วิเคราะห์ระดับอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวที่มีต่อความตั้งใจในการใช้บริการคาร์แชริ่ง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา Joo (2017) ศึกษาปัจจัยที่มีผลการความตั้งใจในการใช้บริการคาร์แชริ่งในประเทศเกาหลีใต้พบว่า ปัจจัยด้านความสะดวกสบาย และปัจจัยด้านการประหยัดเวลามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยของ Hamari *et al.* (2015) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะเข้าร่วมใช้บริการธุรกิจแบ่งปัน (Sharing Economy) ซึ่งคาร์แชริ่งคือหนึ่งในธุรกิจแบ่งปันด้วย จากการศึกษาพบว่าปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่าย ปัจจัยด้านคุณค่าต่อสังคม และปัจจัยด้านความสนุกในการใช้งานมีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะเข้ามาใช้บริการธุรกิจแบ่งปัน นอกจากนี้งานวิจัยของ Deng (2018) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความตั้งใจที่จะใช้คาร์แชริ่งในประเทศจีน คือ ปัจจัยด้านคุณค่าต่อสังคม และปัจจัยด้านการรับรู้ถึงบริการ และการศึกษาของ Giang (2017) พบว่าปัจจัยด้านการรับรู้ถึงการบริการมีผลต่อทัศนคติ และทัศนคติมีผลต่อความตั้งใจในการใช้บริการคาร์แชริ่งในประเทศเวียดนาม

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบแบบสอบถามผู้วิจัยนำตัวชี้วัดที่ใช้ในปัจจัยต่าง ๆ ส่วนใหญ่มาจากงานวิจัยที่ศึกษามาก่อนในต่างประเทศ และตัวชี้วัดบางส่วนกำหนดขึ้นจากประเด็นที่ผู้วิจัยสนใจ โดยปัจจัยที่จะศึกษาประกอบด้วยปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่าย ปัจจัยด้านความสะดวกสบาย ปัจจัยด้านคุณค่าต่อสังคม ปัจจัยด้านการรับรู้ถึงบริการ และปัจจัยด้านความตั้งใจที่จะใช้บริการ ซึ่งสามารถนำมาตั้งสมมติฐานการศึกษาครั้งนี้ได้ 4 ข้อดังนี้

1. ปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่าย (Cost Saving: CS) มีอิทธิพลต่อปัจจัยด้านความตั้งใจที่จะใช้บริการ (Intention to use: ITU) 2. ปัจจัยด้านความสะดวกสบาย (Convenience: CON) มีอิทธิต่อปัจจัยด้านความตั้งใจที่จะใช้บริการ (Intention to use: ITU) 3. ปัจจัยด้านคุณค่าต่อสังคม (Social Value: SV) มีอิทธิพลต่อปัจจัยด้านความตั้งใจที่จะใช้บริการ (Intention to use: ITU) 4. ปัจจัยด้านการรับรู้ถึงบริการ (Awareness: AW) มีอิทธิพลต่อปัจจัยด้านความตั้งใจที่จะใช้บริการ (Intention to use: ITU)

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจะใช้แบบสอบถามโดยแบบสอบถามแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เกี่ยวข้องกับข้อมูลลักษณะประชากรของกลุ่มตัวอย่าง ส่วนที่ 2 เกี่ยวข้องกับระดับความคิดเห็นที่มีต่อคาร์แชริ่งโดยใช้มาตรวัดแบบช่วง (Interval Scale) 5 ระดับ คือ (1) ไม่เห็นด้วย (2) ค่อนข้างไม่เห็นด้วย (3) เห็นด้วยปานกลาง (4) เห็นด้วยมาก (5) เห็นด้วยมากที่สุด และใช้ชุดคำถามแบ่งออกเป็น 29 ข้อ (Table 1)

Table 1 Questionnaire Item.

Indicators	Sources
1. Carsharing can save your money on car ownership cost.	Joo (2017)
2. Carsharing service can save your travel cost.	Joo (2017)
3. Carsharing service can save your parking cost.	by Author
4. You can save money if you use Carsharing.	Hamari *et al.* (2015)
5. Your participation in Carsharing service can improve your economic situation.	Hamari *et al.* (2015)
6. The Carsharing system can alleviate the traffic congestion.	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)
7. The Carsharing system can reduce air and noise pollutions.	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)
8. The Carsharing system increases the use of public transits: BTS or MRTS	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)
9. The Carsharing system can contribute to energy saving.	Joo (2017)
10. The Carsharing system can contribute to efficient usage of parking spots.	Joo (2017)
11. The Carsharing system provides easy accessibility to the system	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)
12. The Carsharing system provides sufficient vehicle.	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)
13. The Carsharing system provides better convenience that take you to any places.	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)
14. The Carsharing system is equipped with technological devices.	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)
15. You can use carsharing any time.	Joo (2017)
16. The Carsharing system helps you travel faster.	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)
17. The Carsharing system will save your shopping time.	by Author
18. The Carsharing system have enough vehicle fleet.	by Author
19. The Carsharing system can be an alternative mode for emergency.	by Author
20. The Carsharing system creates equity in the public's traveling	by Author
21. It is easy for you to get in touch with Carsharing information in your daily life.	Deng (2018)
22. You can get the information of Carsharing from various resources and channels	Deng (2018)
23. The concept and information of Carsharing is easily understood	Deng (2018)
24. You can understand the advantage and figures of Carsharing from the information	Deng (2018)
25. You expect to use Carsharing service.	Hamari *et al.* (2015)
26. You will recommend the Carsharing service to others	Joo (2017)
27. You expect to use Carsharing service instead of using your existing mode.	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)
28. You plan to use the Carsharing service in the future.	by Author
29. You expect to use Carsharing service for your business travel.	by Author

การเก็บข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาจะเก็บข้อมูลบริเวณสถานีให้บริการคาร์แชริ่งจำนวน 4 สถานี คือ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต ศูนย์การค้าฟิวเจอร์พาร์ครังสิต คอนโดมิเนียมไอดีโอโมบิพระราม 9 และศูนย์การค้าแอมพาร์ค โดยเก็บข้อมูลแบบสุ่มตัวอย่างจากบุคคลทั่วไปที่ผ่านบริเวณนั้นทั้งเพศชาย และเพศหญิงที่มีอายุตั้งแต่ 18 ปีขึ้นไป และสามารถทำใบขับขี่ได้ โดยกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ 20 เท่าของตัวแปรสังเกตได้ การเก็บข้อมูลจะเก็บข้อมูลเผื่อไว้ที่ 600 ตัวอย่าง และได้รับการตอบแบบสอบถามที่สมบูรณ์กลับมาจำนวน 590 ตัวอย่าง แบบสอบถามมีความเชื่อมั่น (Cronbach's Alpha) เท่ากับ 0.929 โดยลักษณะประชากรของกลุ่มตัวอย่าง ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงที่ร้อยละ 59 มีช่วงอายุส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 18-25 ปี ที่ร้อยละ 55.9 และส่วนใหญ่มีรายได้อยู่ในช่วง 5,000-15,000 บาท ที่ร้อยละ 46.9 (Table 2)

Table 2 Sociodemographic Characteristics.

Sociodemographic Characteristics	Frequency (N =590)	Percentage (%)
Gender		
Male	242	41
Female	348	59
Age (Years)		
18-25	330	55.9
26-35	131	22.2
36-45	66	11.2
46-55	49	8.3
> 56	14	2.4
Income (Baht per Month)		
< 5,000	32	5.4
5,000-15,000	277	46.9
15,001-25,000	113	19.2
25,001-35,000	66	11.2
35,001-45,000	30	5.1
> 45,001	72	12.2

การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis: EFA) เพื่อจัดกลุ่มตัวแปรชี้วัดเข้าปัจจัยโดยใช้โปรแกรม SPSS 2) การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis: CFA) เพื่อยืนยันโครงสร้างปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ และยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแฝงภายนอก (Exogenous Latent Variable) และปัจจัยแฝงภายใน

(Endogenous Latent Variable) โดยใช้โปรแกรม AMOS และ 3) การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Model: SEM) เพื่อหาอิทธิพลเชิงสาเหตุระหว่างปัจจัยแฝงภายนอกกับปัจจัยแฝงภายในและทดสอบสมมติฐานงานวิจัยโดยใช้โปรแกรม AMOS

ผลและวิจารณ์ผล

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis: EFA)

ผลการทดสอบความเหมาะสมของข้อมูลในการวิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้สถิติทดสอบ Kaiser-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO) ได้ค่าเท่ากับ 0.916 > 0.70 (Hair *et al.*, 2014) ค่า MSA ในตาราง Anti-Image Correlation Matrices พบว่ามีค่า 0.80 – 0.90 > 0.50 (Hair *et al.*, 2014) และการทดสอบ Bartlett's Test of Sphericity พบว่าชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับน้อยกว่า 0.05 (Hair *et al.*, 2014) แสดงว่าชุดตัวแปรชี้วัดมีความเหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์ปัจจัย

การสกัดปัจจัยโดยนำตัวแปรชี้วัดจำนวน 29 ตัวแปรมาสกัดปัจจัยด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis: PCA) โดยพิจารณาค่าความร่วมกัน (Communality) คือ ค่าความแปรปรวนของตัวแปรชี้วัดที่สามารถอธิบายได้ด้วยปัจจัยที่สกัดได้ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0.434-0.809 ซึ่งควรมีค่ามากกว่า 0.50 (Hair *et al.*, 2014) เมื่อพิจารณาค่าไอเก็นมากกว่า 1 และความแปรปรวนรวมสกัดได้มากกว่าร้อยละ 60 (Hair *let a.*, 2014) สามารถสกัดปัจจัยได้ 6 ปัจจัย ทั้งนี้การจัดตัวแปรชี้วัดเข้าปัจจัยโดยใช้ค่าน้ำหนักปัจจัยหลังหมุนแกนแบบฉากด้วยวิธี Varimax สามารถจัดตัวแปรชี้วัดเข้าปัจจัยตามที่คาดหวังไว้ได้จำนวน 5 ปัจจัย และมีปัจจัยที่สกัดเกินมาจากที่คาดหวังไว้จำนวน 1 ปัจจัย เมื่อพิจารณาตัวแปรชี้วัดในปัจจัยที่สกัดได้เกินมาจากที่คาดหวัง พบว่าตัวแปรชี้วัดดังกล่าวได้มาจากการทดลองกำหนดตัวแปรชี้วัดขึ้นมาเองโดยผู้วิจัยมิได้นำมาจากทฤษฎีหรืองานวิจัยที่ศึกษามาก่อน จึงพิจารณาตัดตัวแปรชี้วัดที่ผู้วิจัยทดลองกำหนดขึ้นมาเองบางตัวที่มีค่า Communality ต่ำกว่า 0.50 และตัวแปรชี้วัดที่ไม่เข้าอยู่ในปัจจัยที่คาดหวังออกจำนวน 4 ตัวแปร แล้วทำการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจใหม่อีกครั้งพบว่า

ค่าสถิติทดสอบ KMO ได้ค่าเท่ากับ 0.906 >0.70 (Hair *et al.*, 2014) ค่า MSA เท่ากับ 0.80-0.90 > 0.50 (Hair *et al.*, 2014) Bartlett's Test of Sphericity มีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าตัวแปรชี้วัดที่เหลือจำนวน 25 ตัวแปร ยังคงมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ปัจจัย

การสกัดปัจจัยโดยใช้วิธี PCA และหมุนแกนแบบฉากด้วยวิธี Varimax พบว่าค่าความร่วมกัน (Communality) มีค่า 0.489 - 0.810 มีค่าดีขึ้นจากการวิเคราะห์ครั้งแรกและมีค่าอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี เมื่อพิจารณาที่ค่าไอเก็นมากกว่า 1 และค่าความแปรปรวนรวมสกัดได้มากกว่าร้อยละ 60 สามารถสกัดปัจจัยได้ 5 ปัจจัยตามที่คาดหวัง (Table 3, Table 4)

Table 3 Eigen value and total variance extracted.

Total Variance Explained									
Factor	Initial Eigen values			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	8.605	34.421	34.421	8.605	34.421	34.421	3.579	14.315	14.315
2	2.240	8.959	43.380	2.240	8.959	43.380	3.391	13.566	27.881
3	2.101	8.406	51.786	2.101	8.406	51.786	3.273	13.093	40.974
4	1.762	7.048	58.834	1.762	7.048	58.834	3.094	12.376	53.350
5	1.609	6.434	65.269	1.609	6.434	65.269	2.980	11.919	65.269

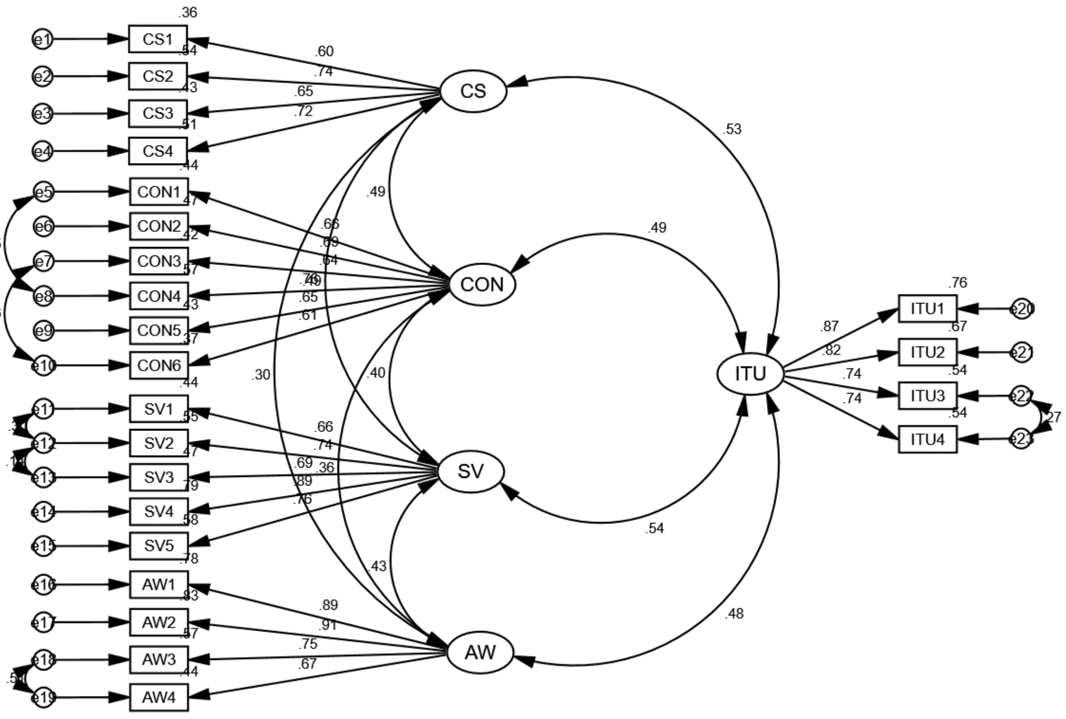
Table 4 Summary Factor Extracted of Exploratory Factor Analysis.

Factors	Indicators	Sources	Loading
Cost Saving	CS1: Car ownership cost saving	Joo (2017)	0.635
	CS2: Travel cost saving	Joo (2017)	0.754
	CS3: Parking cost saving	by Author	0.656
	CS4: Economic benefit	Hamari *et al.* (2015)	0.753
	CS5: Improve economic situation	Hamari *et al.* (2015)	0.674
Social Value	SV1: Reduction of traffic congestion	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)	0.720
	SV2: Reduction of environmental pollution	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)	0.813
	SV3: Support public transits	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)	0.708
	SV4: Energy saving	Joo (2017)	0.824
	SV5: Efficient usage of parking spots	Joo (2017)	0.741
Convenience	CON1: Easy accessibility	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)	0.599
	CON2: Sufficient vehicle	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)	0.755
	CON3: Travel flexible	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)	0.672
	CON4: High technology	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)	0.746
	CON5: All time accessibility	Joo (2017)	0.734
	CON6: Travel faster	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)	0.608
Awareness	AW1: Easy to get Information in daily life	Deng (2018)	0.833
	AW2: Get Information from various channels	Deng (2018)	0.862
	AW3: Information is easily understood	Deng (2018)	0.811
	AW4: Understand advantage from the Information	Deng (2018)	0.778
Intention to use	ITU1: Intention to use	Hamari *et al.* (2015)	0.759
	ITU2: Recommendation to other	Joo (2017)	0.729
	ITU3: Instead of using existing mode	Phoowarawuthipanich *et al.* (2005)	0.762
	ITU4: Plan to use in the future	by Author	0.831
	ITU5: Use for business travel	by Author	0.830

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis: CFA)

ทำการวิเคราะห์ความตรงเชิงโครงสร้าง (Construct Validity) ของปัจจัยทั้งหมดที่สกัดได้จากการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจโดยพิจารณาค่าน้ำหนักปัจจัยควรมีค่ามากกว่า 0.50 ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนสกัดได้ (Average Variance Extracted: AVE) ควรมีค่ามากกว่า 0.50 และค่าความเชื่อมั่นของโครงสร้างปัจจัย (Construct Reliability: CR) ควรมีค่ามากกว่า 0.60 (Hair *et al.*, 2014) และพิจารณาความสอดคล้องของ

แบบจำลองกับข้อมูลเชิงประจักษ์โดยพิจารณาจากค่าดัชนีความสอดคล้องของแบบจำลอง คือ ค่า Norm Chi-Square (χ^2/df) < 2.00, GFI > 0.900, CFI > 0.950, AGFI > 0.900, NFI > 0.900, RMR < 0.05, RMSEA < 0.05 และ SRMR < 0.05 (Hair *et al*., 2014) พบว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ในเกณฑ์ที่ดี จากการวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลองและการพิจารณาค่าดัชนีปรับแก้แบบจำลอง (Modification Indice) จะต้องลดตัวแปรชี้วัดลงเหลือ 23 ตัวแปร และต้องเชื่อมความแปรปรวนร่วมระหว่างความคลาดเคลื่อนของตัวแปรชี้วัด 6 จุด (Figure 1, Table 5)



Chi-square = 428.677, Chi-squre/df = 2.003, df = 214, p = .000, GFI = .939, CFI = .968, AGFI =.922, NFI=.939, RMR = .045, RMSEA = .041, SRMR = 0.0471

Figure 1 Overall Confirmatory Factor Analysis (Standardized Coefficient).

ค่าน้ำหนักปัจจัยของแต่ละปัจจัยแฝงภายนอก และปัจจัยแฝงภายในผ่านเกณฑ์ค่ามากกว่า 0.50 (Hair *et al*., 2014)

Table 5 Construct Validity Test.

Construct	Observed variable	AVE	CR
Cost Saving	4	0.45	0.77
Convenience	6	0.45	0.85
Social Value	5	0.57	0.87
Awareness	4	0.66	0.88
Intention to use	4	0.63	0.87

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Model)

การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง (SEM) วิเคราะห์ต่อจากการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันปัจจัยทั้งหมด (Overall CFA) โดยกำหนดความสัมพันธ์ของปัจจัยแฝงภายนอกและปัจจัยแฝงภายในของแบบจำลองตามสมมติฐานงานวิจัย และวิเคราะห์สัมประสิทธิ์อิทธิพลที่ปัจจัยแฝงภายนอกมีต่อปัจจัยแฝงภายใน (Figure 2)

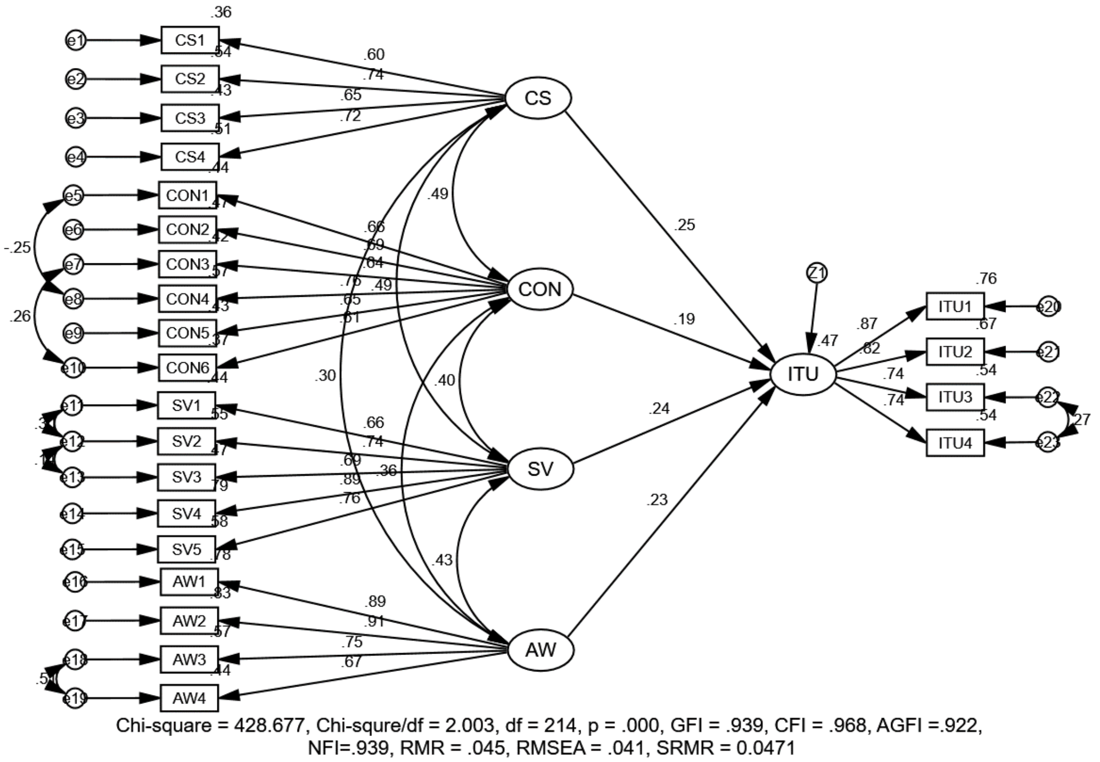


Figure 2 Structural equation model (Standardized Coefficient).

การพิจารณาค่าดัชนีความสอดคล้องของแบบจำลองว่ามีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ คือ ค่า Norm Chi-Square (χ^2/df) < 2.00, GFI > 0.900, CFI > 0.950, AGFI > 0.900, NFI > 0.900, RMR < 0.05, RMSEA < 0.05 และ SRMR < 0.05 (Hair *et al.*, 2014) พบว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ในเกณฑ์ที่ดี (Table 6)

Table 6 Assessment results of fit index.

Fit Index	CFA result	SEM result	Limitation	Description
χ^2/df	2.003	2.003	χ^2/df ≤ 2	Marginal
RMR	0.045	0.045	RMR ≤ 0.05	Good
SRMR	0.047	0.047	SRMR ≤ 0.05	Good
RMSEA	0.041	0.041	RMSEA ≤ 0.05	Good
NFI	0.939	0.939	NFI ≥ 0.900	Good
CFI	0.968	0.968	CFI ≥ 0.950	Good
GFI	0.939	0.939	GFI ≥ 0.900	Good
AGFI	0.922	0.922	AGFI ≥ 0.900	Good

จากการวิเคราะห์อิทธิพลเชิงเส้นทางพบว่าค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล (Path Coefficient) มีทิศทางเป็นแนวเดียวกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ คือ ปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่ายมีอิทธิพลต่อปัจจัยด้านความตั้งใจที่จะใช้บริการ (CS ---> ITU) ปัจจัยด้านความสะดวกสบายมีอิทธิพลต่อปัจจัยด้านความตั้งใจที่จะใช้บริการ (CON ---> ITU) ปัจจัยด้านคุณค่าต่อสังคมมีอิทธิพลต่อปัจจัยด้านความตั้งใจที่จะใช้บริการ (SV ---> ITU) และปัจจัยด้านการรับรู้ถึงบริการมีอิทธิพลต่อปัจจัยด้านความตั้งใจที่จะใช้บริการ (AW ---> ITU) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ p = 0.001 (Table 7)

Table 7 Regression Weight (Unstandardized and Standardized Estimation).

Construct			Unstandardized estimate	S.E.	C.R.	*P*	Standardized estimate
ITU	<---	CS	0.439	0.095	4.623	***	0.252
ITU	<---	CON	0.311	0.081	3.818	***	0.187
ITU	<---	SV	0.293	0.061	4.789	***	0.239
ITU	<---	AW	0.215	0.04	5.383	***	0.233

*** significant at the 0.001 level.

การศึกษาวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่ายมีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะใช้บริการมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hamari *et al.* (2015) ชี้ให้เห็นว่าหากผู้ให้บริการมุ่งเน้นให้บุคคลเห็นว่าการใช้บริการคาร์แชริ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้จะช่วยส่งเสริมให้เกิดการใช้บริการคาร์แชริ่งมากยิ่งขึ้น เช่น การประชาสัมพันธ์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการเดินทางโดยใช้รถยนต์ส่วนบุคคลกับการใช้คาร์แชริ่ง แสดงข้อมูลให้บุคคลเล็งเห็นว่าการใช้คาร์แชริ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ เช่น ค่าจอดรถยนต์ ค่าประกันรถยนต์ ค่าบำรุงรักษา ค่าซื้อรถยนต์ และค่าเสื่อมราคาของรถยนต์ เป็นต้น

ส่วนปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมาคือปัจจัยด้านคุณค่าต่อสังคมซึ่งมีอิทธิต่อความตั้งใจที่จะใช้บริการคาร์แชริ่งอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Deng (2018) และงานวิจัยของ Hamari *et al.* (2015) ชี้ให้เห็นว่าผู้ให้บริการควรจะประชาสัมพันธ์ให้บุคคลเล็งเห็นคุณค่าในการใช้บริการคาร์แชริ่งที่มีต่อสังคม เช่น ประชาสัมพันธ์ให้บุคคลเล็งเห็นว่าการใช้บริการคาร์แชริ่งควบคู่กับการใช้ระบบขนส่งสาธารณะจะช่วยลดปัญหาการจราจรติดขัด และลดปัญหามลภาวะที่เกิดจากจราจรติดขัดได้ เป็นต้น

ปัจจัยที่มีอิทธิพลรองลงมาจากปัจจัยด้านคุณค่าต่อสังคมคือปัจจัยด้านการรับรู้ถึงบริการมีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะใช้บริการอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Deng (2018) และงานวิจัยของ Giang (2017) โดยตัวแปรชี้วัดที่มีน้ำหนักปัจจัยมากที่สุดคือตัวแปรชี้วัดการรับรู้ประชาสัมพันธ์จากหลากหลายช่องทาง ชี้ให้เห็นว่าผู้ให้บริการคาร์แชริ่งต้องมีการประชาสัมพันธ์ถึงการบริการให้มากขึ้น และส่งเสริมการประชาสัมพันธ์ให้คนรู้จักคาร์แชริ่งให้มากขึ้นในหลากหลายช่องทาง เช่น Facebook, YouTube และแพลตฟอร์มออนไลน์รูปแบบอื่น ๆ เป็นต้น

ปัจจัยที่มีอิทธิพลน้อยที่สุดจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้คือ ปัจจัยด้านความสะดวกสบายแต่ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยด้านความสะดวกสบายมีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะใช้บริการคาร์แชริ่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Joo (2017) โดยตัวแปรชี้วัดที่มีน้ำหนักปัจจัยมากที่สุดคือตัวแปรชี้วัดการบริการมีเทคโนโลยีที่ทันสมัย ดังนั้นผู้ให้บริการคาร์แชริ่งควรจะมุ่งพัฒนาแอปพลิเคชั่นให้มีรูปแบบที่ทันสมัยอยู่เสมอมีรูปแบบการใช้งานที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายไม่ซับซ้อน อีกทั้งผู้ให้บริการควรให้ความสำคัญกับจำนวนรถ และจำนวนจุดให้บริการให้ครอบคลุมและทั่วถึง

จากผลการศึกษานี้พบว่าผู้ให้บริการคาร์แชริ่งควรจะมุ่งเน้นและให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่ายเป็นอันดับแรกเพราะมีอิทธิพลต่อความตั้งใจในการใช้บริการมากที่สุด

สรุปผลและเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ สามารถสกัดปัจจัยเกี่ยวกับความตั้งใจที่จะใช้บริการคาร์แชริ่งได้ทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่าย, ปัจจัยด้านความสะดวกสบาย, ปัจจัยด้านคุณค่าต่อสังคม, ปัจจัยด้านการรับรู้ถึงบริการ และปัจจัยด้านความตั้งใจที่จะใช้บริการ

จากการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันเพื่อยืนยันโครงสร้างปัจจัยของปัจจัย 5 ปัจจัยที่สกัดได้จากการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ พบว่าโครงสร้างแบบจำลองปัจจัยมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ในเกณฑ์ที่ดี

จากการวิเคราะห์อิทธิพลเชิงสาเหตุด้วยวิธีแบบจำลองสมการโครงสร้าง ชี้ให้เห็นลำดับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะใช้บริการคาร์แชริ่ง คือ ปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่าย ปัจจัยด้านคุณค่าต่อสังคม ปัจจัยด้านการรับรู้ถึงบริการ และปัจจัยด้านความสะดวกสบายตามลำดับ ดังนั้นผู้ให้บริการคาร์แชริ่งควรให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านการประหยัดค่าใช้จ่ายเป็นอันดับแรก

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตเนื่องจากในงานวิจัยนี้มิได้นำข้อมูลลักษณะประชากรมาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองจึงทำให้ไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะประชากรกับปัจจัย งานวิจัยในอนาคตควรจะทำการวิเคราะห์แบบจำลองแบบมิมิค (MIMIC Model) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะประชากรกับปัจจัย อีกทั้งควรมีการเก็บข้อมูลพฤติกรรมการเดินทางของกลุ่มตัวอย่างเพื่อให้สามารถเข้าใจ และสามารถอธิบายพฤติกรรมของกลุ่มตัวอย่างได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ยุทธ ไกยวรรณ. 2556. **การวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้างด้วย** AMOS. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

_______. 2557. **การวิเคราะห์สถิติหลายตัวแปรสำหรับงานวิจัย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Deng, W. 2018. **Factors Influencing Consumer Intention to Electric Car Sharing Program in China**. M.E. Thesis. ISCTE University Institute of Lisbon.

Giang, P.T., P.T. Trang and V.T. Yen. 2017. An Examination of Factors Influencing the Intention to Adopt Ride-Sharing Applications: A Case Study in Vietnam. **Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)**. 3(10): 618-623

Gliem, J.A. and R.R. Gliem. 2003. Calculating, Interpreting, and Reporting Cronbach's Alpha Reliability Coefficient for Likert-Type Scales, pp. 82-88. *In* **The Midwest Research-to-Practice Conference in Adult, Continuing, and Community Education.** 8-10 October 2003, The Ohio State University. Columbus, United State.

Hair, J.F., W.C. Black, B.J. Babin and R.E. Anderson. 2014. **Multivariate Data Analysis.** Seventh Edition. Pearson Education Limited, England.

Hamari, J., S. Mimmi and A. Ukkonen. 2015. The Sharing Economy: Why People Participate in Collaborative Consumption. **JOURNAL OF THE ASSOCIATION FOR INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY** 67(9): 2047–2059

Joo, J.H. 2017. Motives for Participating in Sharing Economy: Intentions to Use Car Sharing Services. **Journal of Distribution Science** 15(2): 21-26.

Phoowarawuthipanich, A., T. Fukuda,S. Narupiti and A. Fukuda. 2005. Investigating travel behavior associated with the introduction of car-sharing system in Bangkok. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.** 6: 1929–1942.

Kline, R.B. 2011. **Principles and Practice of Structural Equation Modeling.** Third Edition. Guilford Publications, England.

Transit Cooperative Research Program (TCRP). 2005. **Car-Sharing: Where and How It Succeeds: TCRP Report 108**. 264.

การประมาณราคาก่อสร้างอาคารของหน่วยงานราชการด้วยแบบจำลองมอนติคาร์โล

Cost Estimation of Government Construction Project by Monte Carlo Model

ศุภวิชญ์ โสภณสุขสถิตย์[1*] และ ดีบุญ เมธากุลชาติ[1]

Suphawit Sophonsuksathit[1*] and Deeboon Methakullachat[1]

บทคัดย่อ

นักเศรษฐศาสตร์นิยมใช้แบบจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลซึ่งถูกใช้ในการวิเคราะห์และบริหารจัดการโครงการในการลงทุนต่างๆ ถ้านำแบบจำลองดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการประมาณราคาต้นทุนการก่อสร้างของอาคารที่พักอาศัยและอาคารสำนักงานจะช่วยให้หน่วยงานกรมโยธาธิการและผังเมืองประหยัดเวลาและสามารถประมาณค่าใช้จ่ายในโครงการเบื้องต้นได้ง่าย จากการศึกษาพบว่าตัวแปรอิสระ ได้แก่ หมวดงานโครงสร้าง, หมวดงานสถาปัตยกรรม, หมวดงานสุขาภิบาลและหมวดงานไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับต้นทุนราคาก่อสร้างอาคารต่อพื้นที่ใช้สอยมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ การประมาณต้นทุนราคาก่อสร้างทั้ง 4 หมวดงานจาก 45 โครงการสามารถสร้างสมการประมาณราคาต้นทุนการก่อสร้างด้วยวิธีมอนติคาร์โล โดยราคาที่ประมาณได้จะมีราคาที่สูงกว่าราคาก่อสร้างจริงเล็กน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยของความแตกต่างในการประมาณราคาค่าก่อสร้างของบ้านพักอาศัยอยู่ที่ 4.82 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความแตกต่างของการประมาณราคาของอาคารสำนักงานมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับการประมาณต้นทุนราคาก่อสร้างของมูลนิธิประเมินค่าทรัพย์สินแห่งประเทศไทย โดย พ.ศ. 2562 โดยไม่รวมค่าดำเนินการและกำไร 10 เปอร์เซ็นต์ และภาษี 7 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

Economists prefer the Monte Carlo model to be used to analysis various investment of managing projects. If the model is used to estimate the cost of construction of residential and office buildings, the Department of Public Works and Town & Country Planning will save time and can easily estimate the initial project cost. According to research, it is found that the independent variables such as the structure, architecture, sanitation and electricity have the value of correlation matrix are more than 80%. The cost estimation using the Monte Carlo method of 4 categories were created from the statics of cost of construction of 45 government's projects. Comparison between cost estimation by Monte Carlo and construction cost, the different estimation cost and cost of residential and office building were only 4.82 and 6.58, respectively. It was quite the same cost estimation of construction excluding operating and 10% profit and 7% tax of Appraisal & Estate Agents Foundation of Thailand.

Key words: cost estimation, Monte Carlo, construction project, Thai government construction

* Corresponding author; e-mail address: **prosupawit@hotmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

โครงการก่อสร้างที่ประสบความสำเร็จในด้านเศรษฐกิจ วิศวกรรมและคุ้มค่าแก่การลงทุน ต้องปฏิบัติตามขั้นตอนที่ได้ดำเนินตามแผนงานของโครงการ ในส่วนของความคุ้มทุนในการลงทุนและการบริหารจัดการงบประมาณนั้นต้องอาศัยการประมาณราคาก่อสร้างเป็นส่วนประกอบสำคัญในการตัดสินใจของเจ้าของโครงการ และ ในส่วนของผู้รับเหมาก่อสร้างนั้นการประมาณราคาก่อสร้างเป็นหัวใจหลักเนื่องจากการที่ได้รับงานก่อสร้างจากการชนะการประกวดราคา (ธรรมศักดิ์, 2550)

การประเมินราคาการก่อสร้างมีหลากหลายวิธีการ ผลลัพธ์ที่ได้ย่อมแตกต่างกัน อาจมีค่าความคลาดเคลื่อนถึง 15 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ (วิศาลี, 2558) ในการประเมินราคาที่ให้ผลใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงสูงโดยประยุกต์ใช้โปรแกรม 3 มิติในการออกแบบช่วยในการประเมินราคา แต่การใช้โปรแกรมในการออกแบบของหน่วยงานรัฐนั้นยังมิได้จัดทำมาตรฐานในการใช้ให้ใช้โปรแกรมใดและต้องอาศัยความชำนาญของบุคลากรผู้ใช้โปรแกรมอีกด้วย นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มค่าลงทุนในการประมาณราคา ไม่ว่าจะเป็นค่าจัดฝึกอบรมบุคลากรเพื่อใช้งานให้ถูกต้อง ค่าซอฟแวร์และฮาร์ดแวร์ การที่จะนำโปรแกรม 3 มิติมาใช้ในการประมาณราคาจึงต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าและประสิทธิภาพต่อองค์กรด้วย (ชาคริต, 2556) กรมโยธาธิการและผังเมืองเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนหน่วยงานของรัฐในด้านการออกแบบ ประมาณราคาและควบคุมการก่อสร้างอาคารตามที่หน่วยงานของรัฐได้ดำเนินการร้องขอ นอกจากนี้ยังมีบทบาทที่สำคัญเกี่ยวกับการกำหนดมาตรฐานควบคุมอาคารและผังเมือง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในด้านวิศวกรรม (กระทรวงมหาดไทย, 2558)

นักเศรษฐศาสตร์นิยมใช้แบบจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลในการวิเคราะห์และบริหารจัดการโครงการในการลงทุนต่างๆ โดยกระบวนการมอนติคาร์โลได้ถูกพัฒนาขึ้นในช่วง ค.ศ. 1940 โดย Stan Ulam และ Jonh von Neumann (Metropolis, 1987) แบบจำลองมอนติคาร์โลยังถูกใช้ในการประเมินความเสี่ยงของโครงการอีกด้วย (Danielson และ Khan, 2015) และเริ่มมาประยุกต์ใช้ในการประมาณราคาในช่วงปี ค.ศ. 2001 (Clark, 2001) พื้นฐานในการสร้างแบบจำลองมอนติคาร์โลคือกระบวนการทดลองซ้ำในกลุ่มชุดทดสอบโดยการใช้องค์ประกอบหรือตัวแปรและเมทริกซ์สัมพันธ์ ภายหลังจากการทดลองซ้ำผลที่แสดงออกมาจะอยู่ในรูปแบบของฮิสโตแกรมที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรจนเกิดความเสถียรขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาการประมาณราคาในการก่อสร้างได้ (Buchholtz, 2016)

ดังนั้นผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการประมาณราคา โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองมอนติคาร์โลในการประเมินราคาการก่อสร้างอาคาร 1 ถึง 7 ชั้น ของหน่วยงานรัฐบาล ซึ่งมีฐานข้อมูลในโครงการก่อสร้าง เพื่อเป็นทางเลือกในการประมาณราคาในเวลาอันสั้นและงบประมาณไม่สูง และศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อราคาในการก่อสร้าง

ระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาต้นทุนก่อสร้างในโครงการของกรมโยธาธิการและผังเมือง เป็นงานวิจัยเชิงวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นตัวแทนในการประมาณราคาโครงการของหน่วยงานรัฐในอนาคตโดยมีแนวทางการศึกษาดังต่อไปนี้

1. กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา เป็นขั้นตอนในการสร้างกรอบศึกษางานวิจัยและวัตถุประสงค์ในการศึกษา

2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง

3. การเก็บรวบรวมข้อมูล เป็นขั้นตอนในการรวบรวมข้อมูลโครงการก่อสร้างไม่ว่าจะเป็นแบบและราคาต้นทุน ดัชนีก่อสร้าง ดัชนีราคาและราคากลางที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงข้อมูลต้นทุนในการก่อสร้างที่ผ่านมาของกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยการหาต้นทุนราคาก่อสร้างจะใช้วิธีการตามระเบียบของกรมโยธาธิการและผังเมือง

4. จัดหมวดหมู่งานก่อสร้าง ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแบบจำลองจึงดำเนินการแบ่งปริมาณวัสดุและปริมาณแรงงานประกอบกับราคาที่ใช้ในการก่อสร้าง (BOQ) มาแยกตามหมวดหมู่ของงานของแต่ละโครงการ โดยข้อมูลนี้จะแบ่งราคาเป็นค่าวัสดุและค่าแรงงาน และดำเนินการแบ่งหมวดหมู่เพื่อศึกษาปัจจัยของแต่ละหมวดหมู่ต่อการประมาณราคาต้นทุนในการก่อสร้าง โดยจะรวมราคาของงานทุกรายการ ยกเว้น ค่าดำเนินการ กำไร และภาษี จะถูกหักออกไปโดยไม่นำมาร่วมในการประมาณราคาต้นทุนรวมเนื่องจากว่าค่าใช้จ่ายเหล่านั้นมีความผันแปรอย่างมาก

5. ปรับฐานข้อมูล เนื่องจากข้อมูลที่ราคาก่อสร้างอาคารของหน่วยงานรัฐที่รวบรวมมานั้นมีขนาดพื้นที่ใช้สอยที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับฐานข้อมูลราคาต้นทุนค่าก่อสร้างต่อหลัง ให้เป็นราคาในหน่วยเดียวกัน โดยใช้ราคาต่อหน่วยพื้นที่ใช้สอยเป็นตารางเมตร

6. สร้างแบบจำลองประมาณราคาก่อสร้างของหน่วยงานของรัฐ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

6.1 การสร้างฟังก์ชันรูปแบบความน่าจะเป็นของข้อมูลด้วยรูปสามเหลี่ยม

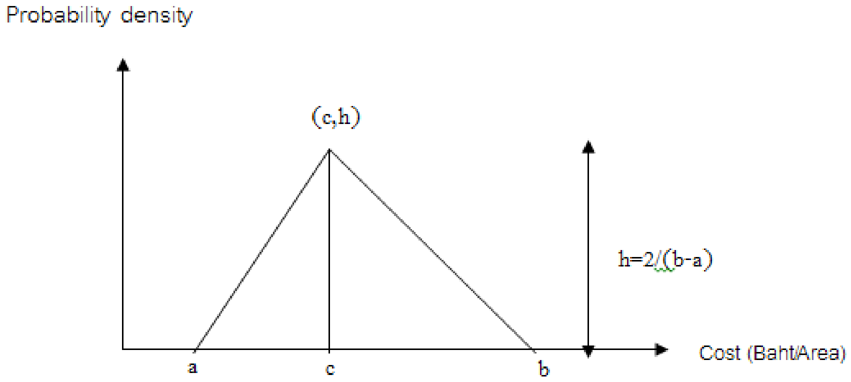


Figure 1 The triangular distribution of construction costs.

เมื่อ a คือ ราคาค่าวัสดุหรือค่าแรงงานที่มีมูลค่าต่ำสุดในแต่ละหมวดงานของกลุ่มตัวอย่าง, b คือ ราคาค่าวัสดุหรือค่าแรงงานที่มีมูลค่าสูงสุดในแต่ละหมวดงานของกลุ่มตัวอย่าง, c คือ ราคาค่าวัสดุหรือค่าแรงงานที่เป็นค่าฐานนิยมในแต่ละหมวดงานของกลุ่มตัวอย่างและ h คือ ความสูงของจุดสูงสุดของกราฟ

6.2) การจำลองโดยใช้เทคนิคมอนติคาร์โล การสร้างแบบจำลองโดยในการวิจัยนี้จะทำการจำลองซ้ำ จำนวน 10,000 รอบ ดังนั้นสามารถหาต้นทุนเฉลี่ยของราคาค่าวัสดุและค่าแรงในแต่ละหมวดหมู่ได้โดยแสดงเป็นสมการ (1) และ (2)

$$Ci=Mi+Li \quad (1)$$

เมื่อ C หมายถึง ค่าก่อสร้าง, M หมายถึง ค่าวัสดุ, L หมายถึง ค่าแรงงาน และ I หมายถึง หมวดหมู่งาน

$$TC = Cs+Ca+Csa+Ce \quad (2)$$

เมื่อ TC หมายถึง ต้นทุนค่าก่อสร้างรวมทั้งโครงการ, Cs หมายถึง ราคาค่าก่อสร้างของหมวดงานโครงสร้าง, Ca หมายถึง ราคาค่าก่อสร้างของหมวดงานสถาปัตยกรรม, Csa หมายถึง ราคาค่าก่อสร้างของหมวดงานสุขาภิบาลและดับเพลิง และ Ce หมายถึง ราคาค่าก่อสร้างของหมวดงานไฟฟ้า

7.) สอบเทียบแบบจำลอง

ผลการศึกษา

การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์และความสัมพันธ์ของตัวแปรหมวดหมู่งานทั้ง 7 หมวดหมู่ ได้แก่ หมวดงานโครงสร้าง, หมวดงานสถาปัตยกรรม, หมวดงานสุขาภิบาลและดับเพลิง, หมวดงานไฟฟ้า, หมวดงานลิฟ, หมวดงานเครื่องกลและหมวดงานระบบอากาศ ซึ่งเป็นหมวดหมู่ที่ใช้แบ่งราคาก่อสร้างตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง จากข้อมูลจำนวนโครงการสำหรับที่พักอาศัย 15 โครงการและอาคารสำนักงาน 30 โครงการรวมทั้งสิ้น 45 โครงการ พบว่า ข้อมูลโครงการที่นำมาใช้ในการศึกษานั้นส่วนใหญ่ไม่ค่อยมีการติดตั้งลิฟและระบบเครื่องกล ในส่วนของระบบปรับอากาศจะมีการใช้ชนิดที่แตกต่างกันออกไป เมื่อดำเนินการศึกษาค่าสหสัมพันธ์และความสัมพันธ์ของตัวแปรจึงส่งผลให้ไม่มีความสัมพันธ์กัน (ค่าความสัมพันธ์น้อยกว่า 0.7) จะส่งผลต่อการประมาณราคาในหมวดนั้นๆให้ไม่มีความแม่นยำจึงไม่ควรนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการมอนติคาร์โล สหสัมพันธ์และความสัมพันธ์ของตัวแปรหมวดหมู่งานของที่พักอาศัยและอาคารสำนักงานแสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ มีเพียง 4 หมวดหมู่ที่มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง ดังนั้นการวิจัยนี้จะศึกษาการประมาณราคาก่อสร้างอาคารของหน่วยงานราชการด้วย

Table 1 Correlation matrix for residents.

Categories	Structural	Architecture	Sanitation	Electrical	Lift systems	Mechanical	Air systems
Structural	1.000	0.995	0.968	0.972	0.572	0.000	0.793
Architecture	0.995	1.000	0.959	0.982	0.637	0.000	0.804
Sanitation	0.968	0.959	1.000	0.956	0.546	0.000	0.869
Electrical	0.972	0.982	0.956	1.000	0.629	0.000	0.799
Lift Systems	0.572	0.637	0.629	0.629	1.000	0.000	0.756
Mechanical	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Air Systems	0.793	0.804	0.756	0.799	0.756	0.000	1.000

Table 2 Correlation Matrix for Office Building

Categories	Structural	Architecture	Sanitation	Electrical	Lift Systems	Mechanical	Air Systems
Structural	1.000	0.946	0.882	0.847	0.625	0.558	0.574
Architecture	0.946	1.000	0.856	0.880	0.703	0.498	0.590
Sanitation	0.882	0.886	1.000	0.834	0.663	0.595	0.344
Electrical	0.847	0.880	0.834	1.000	0.412	0.235	0.475
Lift Systems	0.625	0.703	0.663	0.412	1.000	0.846	0.158
Mechanical	0.558	0.497	0.595	0.235	0.846	1.000	-0.097
Air Systems	0.574	0.590	0.344	0.475	0.158	-0.097	1.000

การวิเคราะห์ข้อมูลราคาค่าก่อสร้าง ในส่วนของราคาค่าวัสดุ จาก 4 หมวดงาน พบว่า ในการก่อสร้างที่พักอาศัย หมวดงานที่มีสัดส่วนราคามากที่สุด คือ หมวดงานสถาปัตยกรรม อัตราส่วนอยู่ที่ 44.08 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาได้แก่ หมวดงานโครงสร้างอยู่ 34.72 เปอร์เซ็นต์ หมวดงานระบบไฟฟ้าอยู่ที่ 11.15 เปอร์เซ็นต์ และหมวดงานระบบสุขาภิบาลอยู่ที่ 10.05 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแบ่งตามประเภทค่าใช้จ่าย พบว่า ค่าวัสดุในการก่อสร้างคิดเป็น 76.58 เปอร์เซ็นต์ในขณะที่ค่าแรงงานในการก่อสร้างคิดเป็น 23.42 เปอร์เซ็น ซึ่งต้นทุนค่าก่อสร้างรวมสำหรับที่พักอาศัยเท่ากับ 14,635 บาทต่อตารางเมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 838.24 ในขณะที่การวิเคราะห์ข้อมูลราคาค่าก่อสร้าง ในส่วนของราคาค่าวัสดุจาก 4 หมวดงาน พบว่า ในการก่อสร้างที่อาคารสำนักงานมีทิศทางเดียวกันกับกลุ่มที่พักอาศัย กล่าวคือ หมวดงานที่มีสัดส่วนราคามากที่สุด คือ หมวดงานสถาปัตยกรรม อัตราส่วนอยู่ที่ 40.00 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาได้แก่ หมวดงานโครงสร้างอยู่ 35.67 เปอร์เซ็นต์ หมวดงานระบบไฟฟ้าอยู่ที่ 15.68 เปอร์เซ็นต์ และหมวดงานระบบสุขาภิบาลอยู่ที่ 8.65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแบ่งตามประเภทค่าใช้จ่าย พบว่า ค่าวัสดุในการก่อสร้างคิดเป็น 76.58 เปอร์เซ็นต์ในขณะที่ค่าแรงงานในการก่อสร้างคิดเป็น 23.42 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต้นทุนค่าก่อสร้างรวมสำหรับที่พักอาศัยเท่ากับ 17,208 บาทต่อตารางเมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1,075.96

จากผลการศึกษาสามารถประมาณราคาจากวิธีมอนติคาร์โลสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการได้ ดังนี้

$$TC = (11,001.17 \times A \times K1) + (3,427.76 \times A \times K2) \quad \text{สำหรับที่พักอาศัย} \quad (3)$$

$$TC = (12,237.59 \times A \times K1) + (3,637.38 \times A \times K2) \quad \text{สำหรับอาคารสำนักงาน} \quad (4)$$

เมื่อ TC คือ ต้นทุนค่าก่อสร้างจากหมวดงานและกลุ่มบ้านที่สนใจ, A คือ ขนาดพื้นที่ของโครงการ (ตารางเมตร), K1=อัตราส่วนดัชนีราคาค่าวัสดุในปีที่จะก่อสร้างเทียบกับดัชนีค่าวัสดุของปี พ.ศ. 2562=107.9) และ K2=อัตราส่วนดัชนีราคาค่าแรงงานในปีที่จะก่อสร้างเทียบกับดัชนีค่าแรงงานของปี พ.ศ. 2562 (ดัชนีแรงงานของปี พ.ศ. 2562=112.1) ค่าดัชนีราคาค่าวัสดุและดัชนีราคาค่าแรงงานได้จากสำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์ ตัวอย่างการนำไปใช้ เช่น อาคารที่พักอาศัยมีพื้นที่ใช้สอยขนาด 169 ตารางเมตร จะดำเนินการก่อสร้างในปี พ.ศ. 2563 สมมุติดัชนีค่าวัสดุและดัชนีแรงงานตามสำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์ในขณะนั้นอยู่ที่ 108.9 และ 114.6 ตามลำดับ สามารถประมาณค่าใช้จ่ายก่อสร้างอาคารอยู่ที่ (11,001.17x169x(108.9/107.9))+(3,427.76x169x(114.6/112.1))=2,468,639 บาท อย่างไรก็ตาม ควรมีการ

ปรับปรุงสมการมอนติคาร์โลเพื่อความถูกต้องแม่นยำ ข้อมูลทางสถิติที่เพิ่มขึ้นและการผันแปรของค่าแรงและวัสดุที่เปลี่ยนไป เมื่อผ่านไปเป็นเวลาหลายปี

ในขณะที่การประมาณราคาอาคารสำนักงาน มูลนิธิประเมินค่าทรัพย์สินแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2562 มิได้กำหนดไว้หากใช้ราคาบ้านพักอาศัยในการเปรียบเทียบ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการประมาณราคาโดยวิธีมอนติคาร์โลซึ่งอยู่ที่ 15,874 บาทต่อตารางเมตร การประมาณของราคาของมูลนิธิประเมินค่าทรัพย์สินแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2562 มีความใกล้เคียงกับต้นทุนเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองมีค่าความแตกต่างไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

Table 2 Comparison between cost estimation by monte carlo and construction cost of house.

Cost Estimation by Monte Carlo (Baht)	Cost of Construction (Baht)	Percentage of Differentiation
2,438,421	2,383,441	2.31
3,650,418	3,324,066	9.82
18,006,803	17,722,945	1.60
7,849,119	8,007,598	1.98
3,606,486	3,327,045	8.40
Average		4.82

Table 3 Comparison between cost estimation by Monte Carlo and construction cost of office building

Cost Estimation by Monte Carlo (Baht)	Cost of Construction (Baht)	Percentage of Differentiation
23,240,952	21,587,052	7.66
19,351,585	20,128,898	3.86
18,414,962	19,504,637	5.59
42,133,884	46,574,188	9.53
21,531,474	20,298,132	6.08
Average		6.54

สรุป

การประมาณราคาค่าก่อสร้างที่พักอาศัยและอาคารสำนักงานระหว่าง 1 ชั้น ถึง 7 ชั้นของหน่วยงานราชการโดยแบบจำลองมอนติคาร์โล ซึ่งตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับต้นทุนราคาก่อสร้างอาคารต่อพื้นที่ใช้สอยมากกว่าร้อยละ 80 มีอยู่ 4 หมวด ได้แก่ หมวดงานโครงสร้าง, หมวดงานสถาปัตยกรรม, หมวดงานสุขาภิบาล และหมวดงานไฟฟ้า สำหรับหมวดงานลิฟต์และหมวดงานเครื่องกลอาคารของรัฐส่วนใหญ่ไม่มีการใช้งานและหมวดงานระบบอากาศมีความผันแปรราคาค่อนข้างมากอันเนื่องมาจากการเลือกใช้ระบบจึงมีความสัมพันธ์น้อย แบบจำลองดังกล่าวสามารถประมาณราคาของอาคารที่พักอาศัยและอาคารสำนักงานของหน่วยงานรัฐได้อย่างรวดเร็วโดยมีค่าความแตกต่างจากราคาก่อสร้างไม่เกิน 10 เปอร์เซนต์ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับมูลนิธิประเมินค่าทรัพย์สินแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2562 โดยการประมาณราคาด้วยวิธีมอนติคาร์โลมีค่าเฉลี่ยสำหรับที่พักอาศัยมี

ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 4.82 เปอร์เซนต์ และมีค่าเฉลี่ยสำหรับอาคารสำนักงานอยู่ที่ 6.54 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ

อาคารที่พักอาศัยมีต้นทุนราคาค่าก่อสร้างจะอยู่ระหว่าง 12,853-17,856 บาทต่อตารางเมตร โดยมีต้นทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 14,428 บาทต่อตารางเมตรส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 838.24 ส่วนอาคารสำนักงานมีต้นทุนราคาค่าก่อสร้างจะอยู่ระหว่าง 12,145-21,918 บาทต่อตารางเมตร โดยมีต้นทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 15,875 บาทต่อตารางเมตรส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1,075.96 บาท ซึ่งต้นทุนดังกล่าวยังไม่รวมค่าดำเนินการ กำไร และภาษี

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณกรมโยธาธิการและผังเมือง กองมาตรฐานราคากลาง ที่ได้ให้การสนับสนุนข้อมูลในการศึกษาวิจัย รวมไปถึงบุคลากรของหน่วยงานที่ได้แนะนำและติชมจนสำเร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงมหาดไทย. 2558. **กฎกระทรวง ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2558) แบ่งส่วนราชการกรมโยธาธิการและผังเมือง พุธศักราช 2557**, 18–27.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2555. **คู่มือการประมาณราคา**, กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย. กรุงเทพฯ.

ชาคริต รักษมาตา, 2556. **ความแม่นยำในการถอดแบบประมาณปริมาณวัสดุก่อสร้างในการพัฒนาโครงการอสังหาริมทรัพย์ โดยวิธีทั่วไปและวิธีที่ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร : กรณีศึกษาอาคารชุดพักอาศัยประเภท A1 บริษัทแอลพีเอ็น ดีเวลอปเมนท์ จำกัด (มหาชน)**, วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธรรมศักดิ์ รุจิระยรรยง. 2550. **การประมาณราคาค่าก่อสร้างอาคารพักอาศัยรวมโดยวิธีวิเคราะห์ความถดถอย**, บทความวิจัย, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต.

วิศาลี นิมมานพัชรินทร์. 2558. **การประมาณราคาค่าก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้นด้วยวิธีแบบจาลองมอนติคาร์โล**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์และการจัดการเชิงธุรกิจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

Buchholtz, J.D., 2016. **An Investigation in Construction Cost Estimation Using a Monte Carlo Simulation**. Thesis of Master Degree of Science in Engineering Management, Department of Systems Engineering and Management, Air Force Institute of Technology.

Clark, D. E. 2001. **Monte Carlo analysis: ten years of experience**. Cost Engineering,46(6), 40–45.

Danielson, C. and H. Khan. 2015. **Risk Analysis of Project Time and Cost Through Monte Carlo Method : A Case Study at Scania CV AB**. Degree Project, in Project Management and Operational Development, Second Level Stockholm, Sweden.

Metropolis, N. 1987. **The Beginning of the Monte Carlo Method**, Las Alamos Science Special Issue 1987.

ความคิดเห็นของนิสิตต่อการพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่และระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) จากควันบุหรี่มือสองภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

Opinions of Students for the Development Smoking Area and PM2.5 Levels from secondhand smoke in Faculty of Engineering, Kasetsart University (Bangkhen)

กำพล ไพรัชเวชภัณฑ์[1*] วันชัย ยอดสุดใจ[1] ปิยนุช เวทย์วิวรณ์[1] และ วีรชัย ชัยวรพฤกษ์[2]

Kumphon Pairushwetchaphan[1*], Wanchai Yodsudjai[1], Piyanut Wethyavivorn[1] and Weerachai Chaiworapuek[2]

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความคิดเห็นของนิสิตต่อการพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่ การรับรู้กฎหมายการสูบบุหรี่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) จำแนกตามกลุ่มผู้สูบบุหรี่และไม่สูบบุหรี่ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ นิสิตจำนวน 250 คน การเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นแบบสอบถามซึ่งผู้วิจัยสร้างขึ้น มีค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.90 วิเคราะห์โดยสถิติพรรณนา เพื่อหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเพื่อประเมินระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM 2.5) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดควันบุหรี่มือสองในบริเวณที่มีการพบเห็นการสูบบุหรี่เป็นประจำ เปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่พบเห็นการสูบบุหรี่ เก็บตัวอย่างต่อเนื่อง 150 นาทีต่อ 1 จุด ผลการวิจัย พบว่าส่วนใหญ่สนับสนุนให้มีการพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่แบบถูกกฎหมายและไม่ทราบกฎหมายเกี่ยวกับการสูบบุหรี่ โดยหวังว่าจะทำให้สภาพแวดล้อมของคนไม่สูบบุหรี่ในสถานศึกษาดีขึ้น และผลการเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง พบว่าระดับ PM 2.5 ทั้ง 2 บริเวณไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ABSTRACT

The objectives of this research were to study the opinions of students for the Development Smoking Area in Faculty of Engineering, Kasetsart University, classifying by smokers and non-smokers. The sample group comprises 250 students. The reliability equals 0.90. The information is analyzed by Descriptive Statistics in order to identify the average and standard deviation. The other was to assess the levels of fine particulate matter with diameters of less than 2.5 microns, an indicator of secondhand smoke took place in frequent smoking is observed area compare with non-smoking is observed area monitoring equipment for 150 minutes/sample. The research shows that opinions are supported the development of legal smoking areas and unknown about laws and them hope that it will improve the environment. And statistical analysis of PM 2.5 levels showed non-significantly higher than those area.

Key Words: Outdoor Smoking Area, Smoke-Free Public, Tobacco Use and Control

*Corresponding author; e-mail address: **kumphon.pa@ku.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา [2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil Engineering [2] Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ควันบุหรี่ที่ผู้สูบบุหรี่พ่นออกมาปนเปื้อนในสภาพแวดล้อมข้างเคียง เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า "ควันบุหรี่มือสอง (Second-hand Smoke)" ศูนย์วิจัยสุขภาพกรุงเทพ (2561) ได้ศึกษาผลกระทบจากควันบุหรี่มือสอง สรุปไว้ว่า ผู้ได้รับควันบุหรี่มือสองจะมีภาวะความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจ โรคมะเร็งปอดมากขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากสารพิษในควันบุหรี่จำนวนมาก เช่น นิโคติน ทาร์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น โดยอยู่ในรูปของก๊าซและอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ทั้งนี้มีงานวิจัยหลายแห่งได้ศึกษาการแพร่กระจายของควันบุหรี่จากระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน เช่น จินตนา (2557) ศึกษาประสิทธิภาพการใช้ห้องพักสูบบุหรี่ของสนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิโดยใช้ตัวชี้วัดจากระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน Lee, *et al*. (2010) ศึกษาฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนในบริเวณห้องพักสูบบุหรี่ในสนามบิน ปัจจุบันสถานการณ์การสูบบุหรี่ในประเทศไทยจากรายงานประจำปี พ.ศ. 2560 (ศูนย์วิจัยและจัดการความรู้เพื่อการควบคุมยาสูบ มหาวิทยาลัยมหิดล) พบว่ามีประชากรไทยอายุตั้งแต่ 15 ปีขึ้นไปสูบบุหรี่เป็นจำนวน 10.7 ล้านคน (คิดเป็นร้อยละ 19.1) โดยมีอัตราการสูบบุหรี่ในกลุ่มอายุ 19-24 ปีถึงร้อยละ 20.7 นอกจากนี้ (จุรีย์ อุสาหะ, 2558) ระบุไว้ถึงทัศนคติเกี่ยวกับการสูบบุหรี่ของวัยรุ่นพบว่า วัยรุ่นมองว่าการสูบบุหรี่เป็นเรื่องปกติมากกว่าวัยรุ่นที่มองการสูบบุหรี่เป็นสิ่งไม่ดี และวัยรุ่นที่สูบบุหรี่กับวัยรุ่นที่ไม่สูบบุหรี่มีความคิดตรงข้ามกัน โดยผู้สูบบุหรี่มองว่าการสูบบุหรี่จะทำให้น่าดึงดูดมากกว่าผู้ที่ไม่สูบบุหรี่ ทำให้ภายในสถานศึกษามักพบเห็นผู้สูบบุหรี่ได้อยู่เป็นประจำ แม้ว่าประเทศไทยจะมีพระราชบัญญัติคุ้มครองสุขภาพของผู้ไม่สูบบุหรี่ พ.ศ. 2535 และปัจจุบันมีการบังคับใช้พระราชบัญญัติควบคุมผลิตภัณฑ์ยาสูบ พ.ศ. 2560 รวมถึงประกาศกระทรวงสาธารณสุข พ.ศ. 2561 เรื่องกำหนดสถานที่เขตปลอดบุหรี่ ซึ่งกำหนดให้สถานศึกษารวมถึงมหาวิทยาลัยเป็นเขตปลอดบุหรี่แล้ว แต่ยังมีรายงานการสำรวจจากมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งพบว่า นักศึกษาส่วนใหญ่ร้อยละ 73.8% ไม่มีความรู้เกี่ยวกับกฎหมายการควบคุมยาสูบของไทย (จักรพันธ์, 2561) ซึ่งตรงกับข้อมูลจากสำนักงานสถิติแห่งชาติ พ.ศ. 2557 พบว่าค่านิยมของสังคมที่มองว่าการสูบบุหรี่ไม่ใช่สิ่งเสพติดที่ผิดกฎหมาย และเพิกเฉย ไม่ให้ความสำคัญต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างแท้จริง แม้กฎหมายจะประกาศให้ในสถานศึกษาระดับอุดมศึกษาจะกำหนดให้ส่วนอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างทั้งหมดเป็นเขตปลอดบุหรี่ 100% ยกเว้นสถานที่ที่จัดไว้เป็น "เขตสูบบุหรี่" เป็นการเฉพาะได้ในพื้นที่นอกอาคาร และกำหนดโทษผู้สูบบุหรี่ในเขตปลอดบุหรี่ไว้สูงสุด 5,000 บาท นอกจากนี้การสำรวจ (จักรพันธ์, 2561) ยังพบว่า นักศึกษากว่า 32.2% พบเห็นการสูบบุหรี่ในเขตปลอดบุหรี่ และเป็นผู้ได้รับควันบุหรี่มือสองในมหาวิทยาลัย การศึกษาครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความคิดเห็นของนิสิตต่อการพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่ รวมถึงการศึกษาการรับรู้กฎหมายเกี่ยวกับการสูบบุหรี่ของนิสิตภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) โดยจำแนกตามกลุ่มผู้สูบบุหรี่และไม่สูบบุหรี่ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ นิสิตที่อยู่ภายในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จำนวน 250 คน โดยการเลือกแบบบังเอิญ (Accidental Sampling) เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นแบบสอบถามซึ่งปรับปรุงมาจาก Mamudu, *et al*. (2011) ที่ศึกษาผลการควบคุมยาสูบของบุคคลากรมหาวิทยาลัยในรัฐเทนเนสซี ประเทศสหรัฐอเมริกา ภายหลังการบังคับใช้นโยบายมหาวิทยาลัยเป็นพื้นที่เขตปลอดบุหรี่ 100% โดยใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่อหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน นอกจากนี้งานวิจัยยังมีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM 2.5) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดแทนการแพร่กระจายของควันบุหรี่มือสอง โดยเก็บตัวอย่างในบริเวณที่

มีการพบเห็นการสูบบุหรี่เป็นประจำ (สวนดงตาล, ข้างอาคารคอมพิวเตอร์) เปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่พบเห็นการสูบบุหรี่ (หน้าอาคาร 1, ใต้อาคารชูชาติ กำภู) เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่ในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

การศึกษาเรื่องความคิดเห็นของนิสิตต่อการพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่ และระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM 2.5) จากควันบุหรี่มือสอง ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1.1 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1.2 รวบรวมข้อมูลเพื่อวางแผนการสำรวจข้อมูล และวิธีการเก็บข้อมูล

1.3 ดำเนินการสำรวจข้อมูล

1.3.1 โดยใช้วิธีการตอบแบบสอบถามจากนิสิตที่อยู่ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

1.3.2 วัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM 2.5) ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

โดยเปรียบเทียบกับสถานีวัดคุณภาพอากาศของบริเวณแยกเกษตรศาสตร์ (สถานีเขตจตุจักร) ของกองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรุงเทพมหานคร

1.4 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา

1.5 สรุปผลการวิจัย

ประชากรและตัวอย่างในการใช้วิจัย

2.1 การตอบแบบสอบถามใช้การสำรวจนิสิตในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) โดยกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างตามหลักการทางสถิติศาสตร์จากสูตร Yamane กำหนดความคลาดเคลื่อนที่ระดับ 0.10 โดยคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยการเลือกแบบบังเอิญ (Accidental Sampling)

2.2 การวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) ในบริเวณที่มีการพบเห็นการสูบบุหรี่เป็นประจำ เปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่พบเห็นการสูบบุหรี่ เก็บตัวอย่างต่อเนื่อง 150 นาทีต่อ 1 จุด วัดครั้งละ 2.5 ชั่วโมงในวันเวลาทำการปกติ พร้อมบันทึกปริมาณผู้สูบบุหรี่

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นแบบสอบถามอ้างอิงส่วนใหญ่มาจากรายงานการควบคุมยาสูบของบุคลากรมหาวิทยาลัยในรัฐเทนเนสซี (Mamudu H.M *et al.*, 2011) ซึ่งได้รับการพัฒนาจากกลุ่มความร่วมมือการเฝ้าระวังระบบยาสูบทั่วโลกขององค์การอนามัยโลก (WHO) ซึ่งจำแนกออกเป็น 5 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 สอบถามเกี่ยวกับข้อมูลประชากรศาสตร์

ตอนที่ 2 สอบถามเกี่ยวกับข้อมูลพฤติกรรมและทัศนคติเกี่ยวกับการสูบบุหรี่

ตอนที่ 3 สอบถามข้อมูลความรู้การสูบบุหรี่และกฎหมายการสูบบุหรี่ภายในสถานศึกษา

ตอนที่ 4 สอบถามข้อมูลความพึงพอใจกรณีที่มีการบังคับใช้กฎหมายการสูบบุหรี่

ตอนที่ 5 สอบถามข้อมูลความคิดเห็นกรณีที่จัดให้มีพื้นที่สูบบุหรี่แบบถูกกฎหมาย

3.2 เครื่องมือตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) เป็นเครื่องมือตรวจวัดที่พัฒนาโดยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีความคลาดเคลื่อนของค่าที่ตรวจวัดไม่เกิน 10%

การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผู้วิจัยนำแบบสอบถามที่รวบรวมได้มาดำเนินการดังนี้

4.1.1 การตรวจสอบข้อมูล เพื่อความแน่ใจว่าข้อมูลที่ได้มานั้นมีความสมบูรณ์ และตรงกับกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ ก่อนนำมาประมวลผลในขั้นต่อไปได้

4.1.2 การลงรหัส นำแบบสอบถามที่ถูกต้องเรียบร้อยแล้วมาลงรหัสตามที่ได้กำหนดไว้

4.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลได้วิเคราะห์และประมวลผลร่วมกับคอมพิวเตอร์ โดยใช้วิเคราะห์โดยหาค่าร้อยละ และการวิเคราะห์เนื้อหาและสังเคราะห์ข้อความเป็นข้อๆ โดยการหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งใช้เกณฑ์การแปลผลค่าคะแนนจากค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 1.00 ถึง 5.00 แสดงความหมายไม่เห็นด้วยอย่างยิ่งหรือไม่จริงที่สุด ถึงเห็นด้วยอย่างยิ่ง หรือ จริงที่สุด

4.2 ผู้วิจัยนำค่าตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองมาเปรียบเทียบเชิงพรรณนา

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บแบบสอบถามโดยเก็บจากประชากรที่อยู่ภายในบริเวณที่ต้องการเป็นกลุ่มตัวอย่างในการใช้วิจัย ได้ผลการตอบแบบสอบถามกลับมาทั้งหมด 328 คน และคัดกรองข้อมูลเหลือ 250 คน ซึ่งครอบคลุมขนาดกลุ่มตัวอย่างตามหลักการทางสถิติศาสตร์จากสูตร Yamane ที่ความคลาดเคลื่อนที่ระดับ 0.10

โดยผู้ตอบแบบสอบถามเป็นเพศชายคิดเป็นร้อยละ 71 เพศหญิงคิดเป็นร้อยละ 29 เป็นผู้ที่ไม่สูบบุหรี่คิดเป็นร้อยละ 64 เคยสูบบุหรี่คิดเป็นร้อยละ 36 โดยปัจจุบันยังสูบบุหรี่คิดเป็นร้อยละ 76 และเลิกสูบแล้วคิดเป็นร้อยละ 24 โดยผู้ที่สูบบุหรี่ในปัจจุบันมีความถี่จากการสูบบุหรี่น้อยกว่า 1 มวนต่อวันคิดเป็นร้อยละ 15 สูบบุหรี่ 1-5 มวนต่อวันคิดเป็นร้อยละ 56 สูบบุหรี่ 6-10 มวนต่อวันคิดร้อยละ 24 อื่น ๆ อีกร้อยละ 5 ตามลำดับ สถานที่สูบบุหรี่เป็นประจำของผู้ที่ยังคงสูบบุหรี่ในปัจจุบัน ได้แก่ ใต้ต้นไม้หรือสวนในร่มคิดเป็นร้อยละ 34 บ้านคิดเป็นร้อยละ 22 สถานที่ภายนอกมหาวิทยาลัยคิดเป็นร้อยละ 19 ห้องน้ำคิดเป็นร้อยละ 8 ทางเดินกลางแจ้งร้อยละ 7 และอื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ10 ตามลำดับ ดังภาพที่ 1

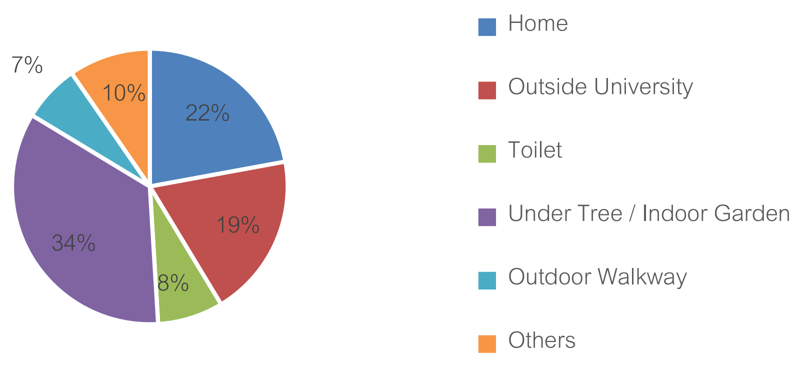


Figure 1 Proportion of current smoking area around faculty of engineering

ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่แจ้งว่าทราบถึงความรู้ด้านกฎหมายเรื่องการสูบบุหรี่ภายในสถานศึกษาคิดเป็นร้อยละ 42 และไม่ทราบความรู้ด้านกฎหมายคิดเป็นร้อยละ 58 แต่เมื่อทดสอบความรู้ด้านกฎหมาย พบว่าไม่มีผู้ตอบแบบทดสอบได้ถูกหมดทุกข้อ สำหรับผู้สูบบุหรี่ภายในสถานศึกษา หากได้รับทราบถึงกฎหมายอย่าง

ครบถ้วน จะยินดีปฏิบัติตามด้วยความเต็มใจร้อยละ 57 ยินดีปฏิบัติตามสภาพแวดล้อมสังคม ณ ขณะนั้นร้อยละ 16 ยินดีปฏิบัติหากได้รับการเตือนจากบุคคลอื่นร้อยละ 14 ยินดีปฏิบัติตามเนื่องจากกลัวบทลงโทษร้อยละ 7 ไม่ยินดีปฏิบัติตามร้อยละ 4 และไม่ยินดีปฏิบัติตาม หากกฎหมายนั้นขัดกับการกระทำในปัจจุบันร้อยละ 2 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 หากพบเห็นผู้อื่นสูบบุหรี่ในบริเวณที่ผิดกฎหมาย จะเข้าไปแจ้งเตือนในทันทีคิดเป็นร้อยละ 17 แจ้งกับแจ้งกับหน่วยงานที่รับผิดชอบเพื่อดำเนินการต่อไปคิดเป็นร้อยละ 30 และเพิกเฉยหรือไม่แจ้งเตือนคิดเป็นร้อยละ 53

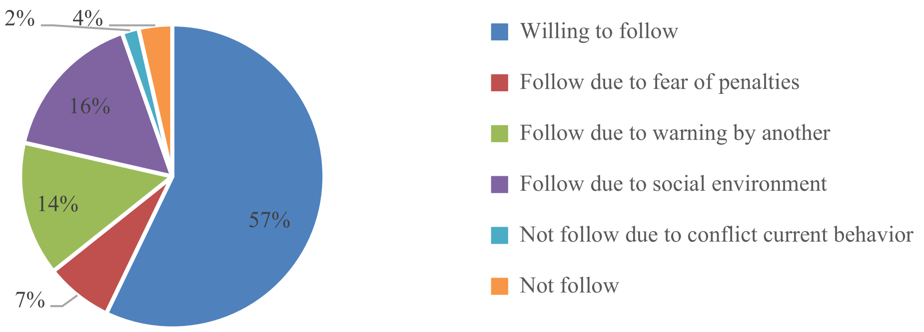


Figure 2 Proportion of willingness on situation's university enforce the law

นอกจากนี้พบว่าคนสูบบุหรี่และคนไม่สูบบุหรี่เห็นด้วยต่อการพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่แบบถูกกฎหมาย และมองว่าจะช่วยลดการสูบบุหรี่ ช่วยคุ้มครองสุขภาพของคนภายในสถานศึกษา ช่วยให้สถานศึกษาประหยัดงบสำหรับรักษาสุขภาพบุคคลากรภายใน ช่วยให้สถานศึกษามีความสะอาดมากขึ้น ช่วยให้ทุกคนตระหนักถึงกฎหมายมากขึ้น ช่วยให้มีการบังคับใช้กฎหมายได้ดียิ่งขึ้น ส่งเสริมและทำให้เกิดวัฒนธรรมการไม่สูบบุหรี่ในสถานศึกษามากขึ้น ทำให้สภาพแวดล้อมของคนไม่สูบบุหรี่ในสถานศึกษาดีขึ้น ทั้งคนเคยสูบและไม่เคยสูบบุหรี่เห็นด้วยกับการสนับสนุนให้มีพื้นที่สูบบุหรี่แบบถูกกฎหมาย และทั้งคนเคยสูบและไม่เคยสูบบุหรี่เห็นด้วยกับการมีสื่อรณรงค์ในพื้นที่สูบบุหรี่แบบถูกกฎหมายจะช่วยจูงใจให้คนเลิกสูบบุหรี่มากขึ้น ดังตารางที่ 1

Table 1 The level of opinions of ever and never smokers towards legal smoking areas.

Text	Ever Smokers			Never Smokers		
	Avg. ($\overline{X}$)	SD	Result	Avg. ($\overline{X}$)	SD	Result
1) Smoking area has reduced of will reduce smoking in university	4.03	0.87	Agree	3.82	0.98	Agree
2) Smoking area has improved or will improve the health of people	4.19	0.79	Agree	4.16	0.78	Agree
3) Smoking area has helped or will help university save money for public health	3.84	1.05	Agree	3.76	0.93	Agree

4) Smoking area has made or will make university cleaner	4.22	0.90	Agree	4.26	0.78	Agree
5) I am satisfied with how smoking area raises awareness about the tobacco-law	3.94	0.98	Agree	3.95	0.90	Agree
6) Smoking area has raised or will raise the enforcement of tobacco-law in university	3.96	0.89	Agree	3.89	0.85	Agree
7) I am satisfied with the legal smoking area	4.30	0.87	Agree	4.30	0.92	Agree
8) Smoking area will improve the environment for non-smokers in the university	4.02	0.92	Agree	3.70	1.05	Agree
9) Smoking area has increased my preference for smoke-free environments	4.33	0.73	Agree	4.30	0.76	Agree
10) I am satisfied with campaign to quit smoking in smoking area	4.00	0.94	Agree	3.91	0.91	Agree

Note – Significance at 10% level, SD = Standard Deviation, Avg. = Average, Result depend on opinion level at 1.00 to 5.00 such as strongly disagree to strongly agree.

จากผลการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) พบว่าปริมาณฝุ่น PM2.5 ที่ตรวจวัดในบริเวณที่มีคนสูบบุหรี่เป็นประจำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้สูบบุหรี่ในขณะนั้นเพียงเล็กน้อย และมีความใกล้เคียงกับจุดวัดคุณภาพอากาศของกรุงเทพมหานครในบริเวณใกล้เคียงกัน หากเปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่มีคนสูบบุหรี่ พบว่าปริมาณฝุ่น PM 2.5 มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับบริเวณที่มีคนสูบบุหรี่เป็นประจำ และมีแนวโน้มใกล้เคียงกับจุดวัดคุณภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร ดังภาพที่ 3 เป็นตัวอย่างการตรวจวัดปริมาณฝุ่นในหนึ่งวัน ซึ่งผลการตรวจวัดวันอื่น ๆ ได้ผลที่คล้ายคลึงกัน

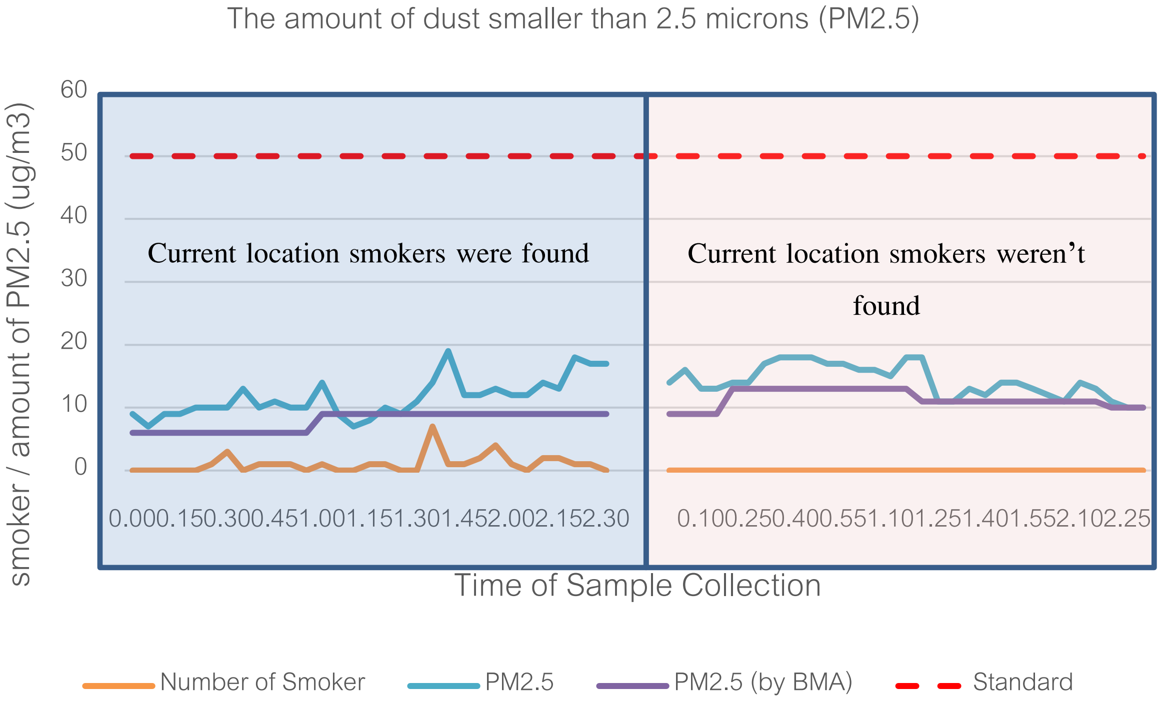


Figure 3 The graph shows the amount of dust smaller than 2.5 microns (PM2.5) in faculty of engineering Kasetsart University Bangkhen compare with air quality monitoring station of Pollution Control Department (Kaset Intersection).

สรุป

ผลการวิจัย พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่สนับสนุนให้มีการพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่แบบถูกกฎหมาย และไม่ทราบกฎหมายเกี่ยวกับการสูบบุหรี่ภายในสถานศึกษา โดยหวังว่าจะทำให้สภาพแวดล้อมของคนไม่สูบบุหรี่ในสถานศึกษาดีขึ้น และผลการเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง พบว่าระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) ทั้ง 2 บริเวณไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่ให้ถูกต้องตามกฎหมายต่อไป เพื่อคุ้มครองบุคคลากรในมหาวิทยาลัย และอาจใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพการพัฒนาพื้นที่สูบบุหรี่จากปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) แทนการวัดการแพร่กระจายของควันบุหรี่ ดังเช่นงานวิจัยจินตนา (2557)

เอกสารอ้างอิง

จินตนา ปีสิงห์. 2557. **ระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) จากควันบุหรี่มือสองในบริเวณใกล้เคียงและภายในห้องพักสูบบุหรี่ของสนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิ.** มหาวิทยาลัยศิลปากร.

จักรพันธ์ เพ็ชรภูมิ, รุ่งนภา แย้มกลีบ, บุญชณัฏฐา พงษ์ปรีชา. 2561. รายงานการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมหลีกเลี่ยงการได้รับควันบุหรี่มือสองของนักศึกษาในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง พ.ศ.2561. **วารสารสาธารณสุขมหาวิทยาลัยบูรพา** 13(2): 89-101.

จุรีย์ อุสาหะ, ฐิติพร กันวิหค, เศรณีย์ จุฬาเสรกุล, วิไลลักษณ์ หฤหรรษพงศ์. 2558. การสังเคราะห์อภิมานงานวิจัยปัจจัยป้องกันพฤติกรรมการสูบบุหรี่ในเยาวชนไทย. **วารสารควบคุมโรค** 41(4).

ศิริวรรณ พิทยรังสฤษฏ์, ปวีณา ปั้นกระจ่าง, กนิษฐา บุญธรรมเจริญ. 2557. **สรุปสถานการณ์ปัจจัยเสี่ยงหลักด้านยาสูบของประเทศไทยพ.ศ. 2557.** เจริญดีมั่นคงการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ศูนย์วิจัยสุขภาพกรุงเทพ. 2561. **ควันบุหรี่มือสอง ตัวการเลิกบุหรี่ไม่สำเร็จ.** บมจ.กรุงเทพดุสิตเวชการ ๖ (Online). http://www.bangkokhealth.com/health/article/ควันบุหรี่มือสอง-ตัวการเลิกบุหรี่ไม่สำเร็จ-2330. 1 กรกฎาคม 2562.

ศูนย์วิจัยและจัดการความรู้เพื่อการควบคุมยาสูบ. 2560. **รายงานสถิติการบริโภคยาสูบของประเทศไทย พ.ศ.2561.** ศูนย์วิจัยและจัดการความรู้เพื่อการควบคุมยาสูบ, กรุงเทพฯ.

สำนักควบคุมการบริโภคยาสูบ กรมควบคุมโรค. 2559. **โครงการสำรวจการบริโภคยาสูบในเยาวชน ประเทศไทย ปี พ.ศ.2558.** กระทรวงสาธารณสุขร่วมกับองค์การอนามัยโลกประจำประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

Mamudu, H.M., S.P. Veeranki and Y. He.. 2011. **A Report on Tobacco Control: A Survey on Tobacco Use and Control among University Personnel in Tennessee.** Tobacco Policy Research Program, East Tennessee State University, Johnson City, TN, May 2011.v

Lee K., E.J. Hahn, L. Robertson, L. Whitten, L.K. Jones and B. Zahn. 2010. Air quality in and around airport enclosed smoking rooms. **Nicotine Tob Res** 12. 665-668.

ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของงานก่อสร้าง กรณีศึกษาสำนักงานโยธาธิการและผังเมือง จังหวัดสมุทรสาคร

The Factors Affecting Delays of Construction Projects: A Case Study of Department of Public Works and Town Planning of Samut Sakhon Province

คณาธิป บุญจันทร์[1*] และ ดีบุญ เมธากุลชาติ[1]

Kanatip Boonchan [1*] and Deeboon Methakullachat[1]

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้จัดทำขึ้นเพื่อระบุปัจจัยที่ทำให้การดำเนินงานโครงการก่อสร้างภาครัฐของสำนักงานภายใต้โครงการสำนักงานโยธาธิการและผังเมือง จังหวัดสมุทรสาคร ที่เกิดความล่าช้า โดยวิเคราะห์สาเหตุและระดับความเสี่ยง ผ่านการใช้แบบสอบถามเพื่อสำรวจความคิดเห็นจำนวน 40 คน โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปมีค่าเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ค่าความคาดเคลื่อน 0.05 จากการศึกษา พบว่าความสำคัญของปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในระดับมาก ค่าปริมาณผลกระทบรวมมีค่าเฉลี่ยสูงสุด 3 ลำดับแรก ได้แก่ 1.ด้านการเงิน 2.ด้านกระบวนการก่อสร้าง 3.ด้านบุคลากร โดยในการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าคะแนนเฉลี่ยรายกลุ่มของผู้ปฏิบัติงานพบว่า ระดับความเสี่ยงของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ บุคลากร การเงิน กระบวนการก่อสร้าง เครื่องมือเครื่องจักร วัสดุอุปกรณ์และปัจจัยอื่นๆมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง ในการบริหารความเสี่ยงควรดูแลด้านการเงินเป็นพิเศษเนื่องจากมีระดับความเสี่ยงปานกลางที่สุ่มเสี่ยง ปัจจัยทางด้านเพศ อายุ การศึกษา ตำแหน่งไม่ส่งผลต่อความแตกต่างต่างของคะแนน

ABSTRACT

The proposes of this research were to quantify effects of construction delays on Thai government projects under Department of Public Works and Town Planning of Samut Sakhon Province by risk management analysis. According to 40 questionnaires of survey, the statistics applying SPSS to analyze found that the first 3 factors affected on construction delays were financial, construction process and personnel, respectively. The average value is low, while the value of risk level was medium for personnel, finance, construction process, machines and tools, materials and other factors. In the risk management, financial should be paid attention because it affected the high impact on the project. However, gender, age, education and position did not affect the difference of construction delays and risk level.

Key words: Factors of construction delays, department of public works and town planning, risk management, Thai government construction, SPSS

* Corresponding author; e-mail address: **kanatip.b@ku.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

โครงการจะสำเร็จตามที่วางแผน จะต้องมีกระบวนการบริหารงานก่อสร้างที่ดี เนื่องจากในงานก่อสร้างมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและสัมพันธ์กันในแต่ละส่วน (ฉันนนรี, 2559) หากเกิดปัญหาในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งย่อมส่งผลต่อขั้นตอนลำดับถัดไปและส่งผลกระทบต่อคุณภาพในงานก่อสร้าง (มนต์ชัย, 2556) โครงการก่อสร้างจะเสร็จเร็ว และไม่เกิดอุปสรรคที่ต้องแก้ไข ย่อมส่งผลให้ควบคุมการใช้ทุนที่มีอย่างจำกัดได้เต็มประสิทธิภาพ และเกิดผลประโยชน์ในเวลาอันสั้น

อย่างไรก็ตามวัสดุ อุปกรณ์และวิธีการในการก่อสร้างได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โครงการก่อสร้างจึงเริ่มตระหนักถึงความคุ้มทุน (สุริยาและศุภรัชชัย, 2558) ในหน่วยงานของรัฐย่อมคำนึงถึงการเร่งดำเนินงานในการก่อสร้างตามนโยบายเร่งด่วนนั้นเพื่อผลประโยชน์ของประชาชนในประเทศในการรองรับการขยายตัวทางเศรษฐกิจหรือเพื่อเพิ่มโอกาสในการเข้าใช้บริการในหน่วยงานของรัฐแก่ประชากรอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากรในประเทศ รวมไปถึงการนโยบายของรัฐบาลที่มีการปรับเปลี่ยนให้ทันสมัย จึงส่งผลให้เกิดปัญหาต่อการบริหารก่อสร้าง (ฉันนนรี, 2559)

กรมโยธาธิการและผังเมืองเป็นหน่วยงานที่สำคัญในการขับเคลื่อนหน่วยงานรัฐต่างๆในหลากหลายด้าน โดยภารกิจหลักที่สำคัญของกรมโยธาธิการและผังเมือง คือ การวางผังเมือง งานออกแบบอาคารและและระบบสาธารณูปโภคภายในอาคาร การตรวจสอบอาคาร รวบไปถึงการควบคุมก่อสร้างอาคารเพื่อสนับสนุนหน่วยงานรัฐต่างๆ ซึ่งมีรู้ความเชี่ยวชาญในการก่อสร้างเป็นอย่างดี (กระทรวงมหาดไทย, 2558)

ผู้ดำเนินการวิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความล่าช้าของงานก่อสร้างของภาครัฐ การศึกษาจะรวมไปถึงปัจจัยเสี่ยงที่ที่ส่งผลให้การดำเนินการก่อสร้างเสียหายหรือล่าช้า ในสภาพการทำงานแบบต่างๆของกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยมุ่งเน้นหลักในการบริหารงานด้านควบคุมงานก่อสร้างและการตรวจรับงาน โดยการเก็บข้อมูลโดยวิธีการออกแบบสอบถาม ถามความคิดเห็นของฝ่ายราชการและเอกชนเพื่อให้ทราบระดับความถี่และความรุนแรงของปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความล่าช้าของโครงการในหน่วยงานของกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยใช้พื้นที่จังหวัดสมุทรสาครเป็นพื้นที่กรณีศึกษา เพื่อนำไปปรับปรุง พัฒนาและแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดในอนาคตในการบริหารจัดการและทดสอบแนวทางแก้ไขเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความล่าช้าในอนาคตต่อไป

ระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัย

การควบคุมงานก่อสร้างของกรมโยธาธิการและผังเมืองในพื้นที่จังหวัดสมุทรสาคร จะอยู่ภายใต้การดูแลของกลุ่มงานควบคุมการก่อสร้างที่ 2 มีหน้าที่ความรับผิดชอบ เกี่ยวกับการควบคุมงานก่อสร้าง งานก่อสร้าง งานบำรุงรักษาตามที่กรมโยธาธิการและผังเมืองได้จัดสรรงบประมาณในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี, นครปฐม, พระนครศรีอยุธยา, เพชรบุรี, ราชบุรี, สมุทรสงคราม, สมุทรสาคร, สุพรรณบุรี และอุทัยธานี งานก่อสร้างจะประกอบไปด้วย งานอาคาร งานเขื่อน งานทางระบายน้ำ งานระบบบำบัดน้ำเสีย งานระบบป้องกันน้ำท่วม งานทางและงานสะพาน สำหรับปริมาณงานก่อสร้างของกรมโยธาธิการและผังเมืองในพื้นที่จังหวัดสมุทรสาคร ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 ถึง 2562 ที่อยู่ในความรับผิดชอบของกองควบคุมการก่อสร้างที่ 2 มีทั้งหมด 7 โครงการซึ่งส่วนใหญ่เป็นโครงการก่อสร้างอาคาร 2 โครงการ และงานเขื่อนป้องกันตลิ่ง 5 โครงการ

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาของภาคเอกชน เช่น ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของงานก่อสร้างในโครงการบ้านจัดสรรระบบสำเร็จรูป (ฉันนนรี, 2559) ในขณะที่หน่วยงานภาครัฐมีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยความล่าช้าในงานก่อสร้างของถนนและอาคารชลประทาน (สุธนัย, 2551; ทัต, 2555; พรรษมลและอภิชาต , 2561) สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยล่าช้าและวิเคราะห์ระดับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในงานก่อสร้างของกรมโยธาธิการและผังเมืองในพื้นที่จังหวัดสมุทรสาครจะเป็นโครงการที่เกี่ยวกับงานก่อสร้างอาคารสำนักงานและเขื่อนป้องกันตลิ่ง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สมมุติฐาน บทบาทของกรมโยธาธิการและผังเมืองช่วยขับเคลื่อนปัจจัยพื้นฐานของหน่วยงานรัฐต่างๆ ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการก่อสร้างของกรมโยธาธิการและผังเมือง จะส่งผลต่อคุณภาพของงานความล่าช้าและความเสียหายทางด้านทรัพสินอันเนื่องมาจากการเสียโอกาสหรือความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงการเป็นผลมาจากการบริหารการก่อสร้าง ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยต่างๆ ได้แก่ บุคลากร การเงิน ขั้นตอนการก่อสร้าง เครื่องมือเครื่องจักร การบริหารวัสดุอุปกรณ์ก่อสร้าง การบริหารด้านเวลา สถานที่ก่อสร้างและปัจจัยอื่นๆ

2. กรอบแนวคิดทางการศึกษา ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Approach) โดยการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Method) และใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล

3. การดำเนินการวิจัย การวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการก่อสร้างอันเนื่องมาจากการบริหารการก่อสร้างในโครงการของกรมโยธาธิการและผังเมือง เป็นงานวิจัยเชิงสำรวจซึ่งการเก็บข้อมูลจะใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่ผลกระทบถึงคุณภาพและความสำเร็จในงานก่อสร้างจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยมีขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่องานก่อสร้างโครงการของกรมโยธาธิการและผังเมือง ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนในการศึกษาวิจัย ดังนี้

1.) กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา

2.) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง จากฐานข้อมูลแต่ละด้าน

3.) ศึกษาระเบียบ ขั้นตอน หน่วยงานที่รับผิดชอบในการบริหารจัดการก่อสร้างของกรมโยธาธิการและผังเมือง รวมไปถึงรวบรวมโครงการก่อสร้างที่กำลังดำเนินการก่อสร้างและเพิ่งจบโครงการไม่เกิน 5 ปีเพื่อใช้ประกอบในการคัดกรองกลุ่มประชากรตัวอย่าง

4.) ศึกษาปัจจัยในการดำเนินการ การเก็บข้อมูลด้านต่างๆรวมทั้งการนำข้อมูลไปใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดเนื้อหาของการวิจัย

5.) จัดทำแบบสอบถามเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ปัจจัยด้านลักษณะส่วนบุคคลทั่วไป ได้แก่ เพศ อายุ ระดับการศึกษา ตำแหน่ง และประสบการณ์การทำงาน

ส่วนที่ 2 สอบถามปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อคุณภาพการก่อสร้างในการก่อสร้างของโครงการที่อยู่ภายใต้การดำเนินการก่อสร้างของกรมโยธาธิการและผังเมือง แบ่งออกเป็น 6 ด้าน ได้แก่ บุคลากร, การเงิน, กระบวนการก่อสร้าง, เครื่องมือ-เครื่องจักร, วัสดุก่อสร้าง และปัจจัยอื่นๆ

การให้คะแนนความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมงานก่อสร้าง มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการจัดลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยนั้นๆ ว่ามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมงานก่อสร้างมากน้อยเพียงใด

ลักษณะแบบสอบถามเป็นประเภทบวก (Positive) ให้ผู้ตอบแบสอบถามเลือกประเมิน 5 ระดับ ได้แก่ ระดับ 5 เห็นด้วยมากที่สุด, ระดับ 4 เห็นด้วยมาก, ระดับ 3 เห็นด้วยปานกลาง, ระดับ 2 เห็นด้วยน้อย และ ระดับ 1 เห็นด้วยน้อยที่สุด

เมื่อรวบรวมข้อมูลและแจกแจงความถี่แล้ว จะได้คะแนนเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง แบ่งระดับความคิดเห็นออกเป็น 5 ระดับเพื่อเป็นเกณฑ์ในการประเมินผลการอภิปรายในส่วนของ Descriptive ผลของการวิจัย ลักษณะแบบสอบถามที่ใช้ระดับการวัดข้อมูลประเภทอันตรภาคชั้น (Interval Scale) ผู้วิจัยใช้เกณฑ์เฉลี่ย ดังนี้

ค่าเฉลี่ย 4.21–5.00 หมายถึง เห็นด้วยมากที่สุด, ค่าเฉลี่ย 3.41–4.20 หมายถึง เห็นด้วยมาก, ค่าเฉลี่ย 2.61–3.40 หมายถึง เห็นด้วยปานกลาง, ค่าเฉลี่ย 1.81–2.60 หมายถึง เห็นด้วยน้อย และค่าเฉลี่ย 1.00–1.80 หมายถึง เห็นด้วยน้อยที่สุด

Table 1 Risk Management index of construction delays.

Index	Risk management	Meaning
1-4	Low	Acceptable risk, but it should be additional risk control
5-9	Medium	Acceptable risk, but it needs additional risk control to prevent high risk.
10-16	High	Cannot acceptable risk, it need progress risk control to reduce risk management.
17-25	Very High	Cannot acceptable risk, it urgent to quantify progress risk control to reduce risk management.

6. การเก็บข้อมูล ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลวิจัย 2 ประเภท คือการเก็บข้อมูลแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิ

6.1 ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) เป็นข้อมูลเชิงสำรวจ การรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถาม โดยนำแบบสอบถามแจกให้กับผู้ปฏิบัติงานในด้านการบริหารงานก่อสร้างของภายใต้โครงการของกรมโยธาธิการและผังเมือง ทั้งในรูปแบบสอบถามออนไลน์และแบบสอบถามที่เก็บด้วยตัวเอง

6.2 ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) เป็นข้อมูลที่รวบรวมจากการทบทวนวรรณกรรมทั้งในประเทศและต่างประเทศ เอกสารทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ประกอบในการกำหนดกรอบความคิดในการวิจัยครั้งนี้

การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่าง ต้องมีการกำหนดประชากรให้เหมาะสม จำนวนกลุ่มตัวอย่างนั้นส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มตัวอย่างจึงต้องมีกระบวนการคัดสรรกลุ่มตัวอย่าง เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือและมีความถูกต้อง (มารยาทและปราณี, 2558) เนื่องจากทราบจำนวนประชากรที่ต้องการศึกษา และต้องการควบคุมความคลาดเคลื่อนจากตัวอย่าง โดยในที่นี้กำหนดอยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้สูตรของการคำนวณกลุ่มตัวอย่างของ ทาโร ยามาเน่ (Yamane) ซึ่งมีรายละเอียดในการคำนวณ ดังสมการที่ 1

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

โดยที่ n คือ ขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการศึกษา, N คือ ขนาดของประชากร และ E คือ ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้ ประชากรกลุ่มตัวอย่างคัดเลือกจาก วิศวกรควบคุมงาน วิศวกรควบคุมคุณภาพ ช่างโยธาควบคุมงานในหมวดงานต่างๆผู้ดูแลงานก่อสร้างภายใต้การดูแลของกรมโยธาธิการและผังเมือง กลุ่มงานควบคุมการก่อสร้างที่ 2 จำนวน มีทั้งสิ้น 59 คน และผู้บริหารโครงการเอกชนผู้ดำเนินการรับจ้างเหมาในโครงการในเขตพื้นที่รับผิดชอบ 7 คน รวมเป็น 66 คน จากสูตรของการคำนวณกลุ่มตัวอย่างของ ทาโร ยามาเน่ พบว่าต้องใช้ประชากรตัวอย่าง 40 คน

7. การวิเคราะห์ข้อมูล เป็นการนำข้อมูลจากการตอบแบบสอบถามมาวิเคราะห์โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

7.1 การตรวจสอบข้อมูล (Editing) ผู้วิจัยต้องตรวจสอบความถูกต้อง และความสมบูรณ์ของข้อมูลในแบบสอบถาม และแยกแบบสอบถามที่ไม่สมบูรณ์ออกไป

7.2 การลงรหัส (Coding) นำแบบสอบถามฉบับสมบูรณ์มาลงรหัสตามที่กำหนดไว้

7.3 นำแบบสอบถามที่ลงรหัสแล้วไปบันทึกลงในโปรแกรมประมวลผลโดยใช้โปรแกรม สำเร็จรูปทางสถิติประมวลผลข้อมูล โดยในการวิจัยครั้งนี้ใช้ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (Level of Significance)

7.4 การวิเคราะห์ข้อมูลในแบบสอบถามจะทำการวิเคราะห์ค่าสถิติ 2 ประเภท ดังนี้

(1) สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistic) ผู้วิจัยได้ใช้สถิติเชิงพรรณนาสำหรับการ วิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น เพื่ออธิบายข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยแสดงค่าร้อยละ (Percentage) ค่าความถี่ (Frequency) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน นอกจากนี้ยังศึกษาแนวทางการแก้ไขจากผลการศึกษาที่ผ่านมาเพื่อหาแนวทางและมาตรการป้องกันแก้ไขกระบวนที่ส่งผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้าง โดยนำมาทดสอบปรับปรุงการปฏิบัติงานในโครงการของหน่วยงานและเปรียบเทียบผล

(2) สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) ในการวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ในการทดสอบสมมติฐาน กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

8. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษา

เพศของผู้ตอบแบบสอบถามมากที่สุดคือเพษชาย คิดเป็นร้อยละ 92.5 ในขณะที่เป็นเพศหญิงมีเพียงร้อยละ 7.5 อายุของผู้ตอบส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 21–50 ปี แบ่งเป็น อายุ 41–50 ปี 5 เปอร์เซ็นต์ อายุ 61-40 ปี 45 เปอร์เซ็นต์ และ อายุ 21-30 ปี 50 เปอร์เซ็นต์ ระดับการศึกษาสูงสุดของผู้ตอบแบบสอบถาม คือระดับปริญญาโท 12.5 เปอร์เซ็นต์ ระดับปริญญาตรี 60 เปอร์เซ็นต์ และระดับต่ำกว่าปริญญาตรี 27.5 เปอร์เซ็นต์ ประสบการทำงานอยู่ระหว่าง 0-10 ปี

ผู้ตอบแบบสอบถามให้ความสำคัญกับของระดับความคิดเห็นต่อปัจจัยด้านบุคลากรทั่วไปอยู่ระดับน้อย โดยให้ความสำคัญต่อการขาดประสบการควบคุมงานและแรงงานหยุดเนื่องจากเทศกาลมากที่สุดที่ 3.5 ในขณะ

ที่ปัจจัยด้านการเงินมีความเห็นในระดับปานกลาง โดยให้น้ำหนักของการรับค่างวดล่าช้ามากที่สุดถึง 4.00 ปัจจัยด้านกระบวนการก่อสร้างมีความเห็นเฉลี่ยอยู่ที่ระดับน้อย โดยให้น้ำหนักในการเปลี่ยนแปลงสัญญา (เพิ่ม-ลดงานมากที่สุดที่ 3.25 ปัจจัยด้านเครื่องมือเครื่องจักรให้ความสำคัญเฉลี่ยในระดับน้อยโดยให้ความสำคัญเกี่ยวกับการที่ไม่สามารถนำเครื่องจักรเข้าพื้นที่ 2.75 ด้านวัสดุก่อสร้างให้ความสำคัญเฉลี่ยในระดับน้อยโดยให้ความสำคัญเกี่ยวกับการขออนุมัติเปลี่ยนแปลงวัสดุหรือใช้วัสดุเทียบเท่ามากที่สุดที่ 2.5 และให้ความสำคัญเฉลี่ยในระดับน้อยโดยให้ความสำคัญเกี่ยวกับปัจจัยอื่นๆ โดยให้ความสำคัญกับภัยธรรมชาติและการส่งมอบพื้นที่ล่าช้า โดยความสำคัญดังกล่าวไม่มีผลต่อปัจจัยด้าน อายุ การศึกษา ตำแหน่งและประสบการการทำงาน

Table 3 Mean and Standard Deviation of opinion levels of personal on construction delays.

Factor	Average	S.D.	Level	Risk Level
1. Personal	2.32	0.28	Low	Medium
Lack experience	3.50	0.50	High	High
Design mistake	2.25	0.83	Low	Medium
Misread drawing	3.00	1.00	Medium	Medium
Miscommunication	2.75	0.83	Medium	Medium
Supervisors / contractors cannot solve immediate problems	2.50	0.87	Low	Medium
Worker no skills	2.75	0.83	Medium	Medium
Accidents	1.50	0.87	Very Low	Low
Out work due to safety reasons	1.25	0.43	Very Low	Low
No incentive for work	1.00	0.00	Very Low	Low
Inspection Board disagreed	1.75	0.83	Very Low	Low
Workers strike or leave work	1.25	0.43	Very Low	Low
Workers are off work during the holiday season	3.50	0.50	High	Medium
Labor shortage due to agricultural season	3.25	0.83	Medium	High
Not working overtime	2.75	1.09	Medium	Medium
Inspection out of duty	1.75	0.83	Very Low	Low

Table 2 Mean and Standard Deviation of opinion levels of financial on construction delays.

Factor	Average	S.D.	Level	Risk Level
2. Financial	2.65	0.23	Medium	Medium
Lack of financial condition	2.50	0.50	Low	Medium
Disbursed late	3.25	0.83	Medium	High
Median price with construction conflicts	3.00	1.22	Medium	High
Financial out of plan	1.50	0.50	Very Low	Low
Credit line approvals	1.50	0.50	Very Low	Low
Price competition	3.75	0.83	High	High
The price of construction is too low to be true	2.75	0.83	Medium	High
The baht value is too weak	1.75	0.83	Very Low	Low
Fluctuating oil prices	2.50	0.50	Low	Medium
Late payment received (addition work/ finish late)	4.00	0.71	High	Very High

Table 4 Mean and Standard Deviation of opinion levels of construction process on construction delays.

Factor	Average	S.D.	Level	Risk Level
3. Construction Process	2.38	0.47	Low	Medium
Inappropriate use of construction technology	2.00	0.00	Low	Medium
Improper time planning	2.75	1.30	Medium	High
Planning for inappropriate material purchasing	2.25	0.43	Low	Medium
Contract conflicts with the law	2.00	0.71	Low	Medium
Plan the construction without checking site	2.75	1.30	Medium	High
Waiting for soil survey results	1.50	0.50	Very Low	Low
Contract changes (Increase - decrease work)	3.25	1.09	Medium	High
Unclear drawing	2.75	1.09	Medium	High
Wrong construction or skipping construction process	2.50	1.50	Low	Low
Waiting for engineering test results	2.00	1.00	Low	Low

Table 5 Mean and Standard Deviation of opinion levels of tools and machines on construction delays.

Factor	Average	S.D.	Level	Risk Level
4. Tools and Machines	2.08	0.23	Low	Medium
The machinery is frequently lacking in maintenance	2.00	1.00	Low	Low
Use of inappropriate tools	1.75	0.83	Very Low	Low
Wait for the rental / machine queue	2.25	1.09	Low	Low
Unable to bring the machine into the work area	2.75	0.43	Medium	Medium
Unable to work during public holidays	2.00	1.00	Low	Medium
Lack of spare parts for maintenance due to lack of market	1.75	0.83	Very Low	Low

Table 6 Mean and Standard Deviation of opinion levels of other factors on construction delays.

Factor	Average	S.D.	Level	Risk Level
5. Materials	2.19	0.29	Low	Medium
The construction site is far from the material source	2.50	0.50	Low	Medium
Lack of equipment and supplies	2.25	0.43	Low	Medium
Use of poor quality materials	1.75	1.30	Very Low	Low
The material price fluctuates according to the economy	2.50	0.87	Low	Medium
Competition for raw materials with contractors in the area	1.75	0.83	Very Low	Low
Far away from public utilities	2.00	0.71	Low	Low
Cannot be transported through a large truck	2.00	0.71	Low	Medium
Requesting approval of equivalent materials is difficult	2.50	1.12	Low	Medium
Requesting approval of material change	2.50	1.12	Low	Medium

Table 7 Mean and Standard Deviation of opinion levels of other factors on construction delays.

Factor	Average	S.D.	Level	Risk Level
6. Other Factors	2.31	0.12	Low	Medium
Natural disaster	2.00	0.71	Low	Medium
Bad climate	2.50	0.87	Low	Medium
Having problems migrating utility systems	2.00	0.71	Low	Medium
The terrain is not ergonomic	2.25	0.83	Low	Medium
Local political delays	2.25	0.83	Low	Medium
The scope of work is not clear	2.25	0.83	Low	Medium
cannot access to construction area	2.50	0.87	Low	High
delays time to access to construction area	2.50	0.50	Low	Medium
Problem of complaints from the local people	2.50	0.87	Low	High

สรุป

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นงานศึกษาวิจัยเชิงสำรวจเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของงานก่อสร้าง กรณีศึกษาสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดสมุทรสาคร งานวิจัยครั้งนี้ได้เก็บข้อมูลจากแบบสอบถาม จำนวน 40 จากกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธีของ ทาโร ยามาเน่ในการกำหนดกลุ่มตัวอย่างจากประชากรทั้งหมดโดยกำหนดค่าเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ค่าความคาดเคลื่อน 0.05 โดยให้ผู้ปฏิบัติงานของกรมโยธาธิการและผังเมืองเป็นผู้ตอบแบบสอบถามและนำมาประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลได้ผลดังนี้

ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความล่าช้าต่อโครงการก่อสร้างของสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดสมุทรสาครมีระดับเฉลี่ยอยู่ที่ระดับปานกลาง โดยความสำคัญของปัจจัยด้านการเงินมีความสำคัญมากที่สุด รองลงมาเป็นกระบวนการก่อสร้าง บุคลากร ปัจจัยด้านอื่นๆ วัสดุก่อสร้างและเครื่องมือเครื่องจักร ตามลำดับซึ่งเป็นไปตามทิศทางของงานวิจัย พรรษมล เทียนพู และ อภิชาต ประสิทธิ์สม ที่ศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในการดำเนินงานโครงการก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษา: โครงการก่อสร้างอาคารชลประทานของสำนักงานชลประทานที่ 9 และ จิรศักดิ์ คำเรืองศรี และธนาตย์ ทองเชื่อมที่ศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าต่อการก่อสร้างในงานราชการ

เมื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความล่าช้าต่อโครงการก่อสร้างของสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดสมุทรสาครจากแบบสอบถามและรายงานการดำเนินการก่อสร้างที่เกิดขึ้นพบว่าเป็นความเห็นที่สอดคล้องกัน โดยงานก่อสร้างประเภทอาคารในช่วง ปี พ.ศ. 2561-2562 มีสภาพงานล่าช้ากว่าแผน 20-40 เปอร์เซ็นต์ จากการขาดสภาพคล่องในทางด้านการเงินของผู้รับจ้างที่มีสภาพการเงินขาดช่วง ปัญหาสภาพหน้างานเป็นอุปสรรค์ และการขาดแคลนพนักงานในการดำเนินการก่อสร้าง ในขณะที่งานก่อสร้างประเภทเขื่อนป้องกันตลิ่งล่าช้ากว่าแผนเล็กน้อยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากปัญหาสภาพการเข้าพื้นที่ทำงาน การขออนุญาติในการก่อสร้างของหน่วยงานรัฐที่เกี่ยวข้องและปัญหาเรื่องแบบก่อสร้างขัดแย้งเป็นหลัก

ในด้านของความเสี่ยงปัจจัยด้านการเงิน กระบวนการก่อสร้าง บุคลากร ปัจจัยด้านอื่นๆ วัสดุก่อสร้างและเครื่องมือเครื่องจักร โดยรวมอยู่ในระดับปานกลาง ระดับความเสี่ยงยังยอมรับได้แต่ต้องมีการลดและควบคุมความเสี่ยงเพิ่มเติม เพื่อไม่ให้เกิดความเสี่ยงเพิ่มมากขึ้นไปอยู่ในระดับยอมรับไม่ได้ ปัจจัยที่ต้องกำหนดและควบคุมเนื่องจากส่งผลกระทบต่อความล่าช้ามากที่สุดคือด้านการเงินเนื่องจากมีระดับความเสี่ยงมากถึง 9 เกือบจะเข้าสู่ระดับมาก มีความจำเป็นที่จะต้องบริหารความเสี่ยงเพื่อให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ส่งผลกระทบต่อโครงการในระดับสูง

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณกรมโยธาธิการและผังเมือง กองมาตรฐานราคากลางและสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดสมุทรสาคร ที่ได้ให้การสนับสนุนข้อมูลในการศึกษาวิจัย รวมไปถึงบุคลากรของหน่วยงาน ที่ได้ให้ข้อมูลและตอบแบบสอบถามอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงมหาดไทย. 2558. **กฎกระทรวง ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2558) แบ่งส่วนราชการกรมโยธาธิการและผังเมือง พุธศักราช 2557**, 18-27.

จิรศักดิ์ คำเรืองศรี และธนาตย์ ทองเชื่อม. 2555. **ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าต่อการก่อสร้างในงานราชการ**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมและการบริหารก่อสร้าง, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ฉันนนรี ชะอุ่ม. 2559. **ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของงานก่อสร้างในโครงการบ้านจัดสรรระบบสำเร็จรูป**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

ทัต นาควิเชียร, 2555. **ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างถนนขององค์การปกครองท้องถิ่นในเขตปริมณฑล**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมงคลธัญบุรี.

พรรษมล เทียนพู และ อภิชาต ประสิทธิ์สม. 2561. ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในการดำเนินงานโครงการก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษา: โครงการก่อสร้างอาคารชลประทานของสำนักงานชลประทานที่ 9, **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต** 8(2).

มนต์ชัย วงศ์สันติราษฎร์. 2556. **ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมงานก่อสร้างกรณีศึกษาองค์การบริหารส่วนตำบลภายในจังหวัดนครราชสีมา**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มารยาท โยทองยศและปราณี สวัสดิสรรพ์. 2558. **การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างเพื่อการวิจัย**, ศูนย์บริการวิชาการ, สถาบันส่งเสริมการวิจัยและพัฒนานวัตกรรม.

มัลลิกา บุนนาค. 2548. **สถิติเพื่อการตัดสินใจ**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สุธนัย วงศ์สารภี. 2551. **การศึกษาปัจจัยที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดความล่าช้ากับงานก่อสร้างถนนของกรมทางหลวง**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมและการบริหารก่อสร้าง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุริยา สวนแก้ว และศุภรัชชัย วรรัตน์. 2558. **การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการบริหารงานก่อสร้างอาคารองค์การบริหารส่วนตำบลละหาร**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาการจัดการทางวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.

การศึกษาพฤติกรรมการใช้อาคาร อุปสรรคและข้อจำกัดทางกายภาพของที่พักอาศัยของผู้สูงอายุภาวะสมองเสื่อมในประเทศไทย

The Study of Building Use Behavior, Obstacle and Physical Limitation of Residential Building of Elderly with Dementia in Thailand

นวลวรรณ ทวยเจริญ[1*] วนารัตน์ กรอิสรานุกูล[2] ชติพัทธ์ ณะมณี[3] และ รัชด ชมภูนิช[4]

Nuanwan Tuaycharoen[1*], Wanarat Kornisranukul[2], Chatipath Namanee[3], Ratchot Chompoonich[4]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมการใช้อาคาร อุปสรรคและข้อจำกัดทางกายภาพเดิมของที่พักอาศัยปัจจุบันที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูผู้สูงอายุภาวะสมองเสื่อมในประเทศไทย การศึกษาได้ทำการสำรวจในสภาพแวดล้อมของที่พักอาศัยบ้านเดี่ยวจำนวน 30 กรณีศึกษา ผลการศึกษาสรุปได้ว่าสภาพแวดล้อมบ้านพักอาศัยแบบเดี่ยวโดยภาพรวมผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมและผู้ดูแลต้องการสภาพแวดล้อมของบ้านในส่วนต่าง ๆ ที่มี บรรยากาศที่ส่งเสริมความทรงจำและอุปกรณ์ช่วยให้เกิดความปลอดภัยกรณีเกิดอุบัติเหตุ เช่น การหกล้มและอาการเจ็บป่วย เป็นต้น

Abstract

The objective of this study is to investigate building use behavior, obstacles and physical limitation of existing residential building affecting dementia recovery in elderly in Thailand. A survey was carried out in 30 private house environment. Results of the study suggested that for overall private houses in Thailand, most elderly with dementia and care givers would like their house to have memory supporting environment and facilities for safety and preventing accidents in the house such as their fall and illness.

Key words: Elderly, Dementia, Detached house

*Corresponding author; e-mail address: nuanwan@gmail.com

---

[1] อาจารย์ประจำภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[2] อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีชนบท คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[3] นิสิตระดับปริญญาโท ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[4] อาจารย์ประจำภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทนำ

โรคสมองเสื่อมเป็นภาวะที่การทำงานของสมองด้านการรู้คิดและสติปัญญาเสื่อมถอยลง ทำให้บุคคลนั้นๆ เกิดภาวะทุพพลภาพและมีภาวะพึ่งพาถือว่าเป็นปัญหาสุขภาพเรื้อรังของผู้สูงอายุ ส่งผลกระทบต่อครอบครัวไม่ว่าจะเป็นทางด้านเศรษฐกิจที่ทางครอบครัวต้องเสียค่าใช้จ่ายในการรักษา ผลกระทบทางจิตใจและสังคม (จันทร์ชัย และ ชาดา, 2544) ถึงแม้ว่าในต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศในฝั่งตะวันตกได้มีความพยายามที่จะศึกษาหาแนวทางบำบัดโรคสมองเสื่อมอยู่หลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาหาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับโรงพยาบาล สถานสงเคราะห์คนชราหรือที่พักอาศัยประเภทบ้านเดี่ยว (Department of Health, 2015; Marquardt and Schmieg, 2009; Marquardt, 2011; Torrington and Tregenza, 2007) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันในประเทศไทยสภาพแวดล้อมทางอาคารของบ้านพักอาศัยแบบเดี่ยวโดยส่วนใหญ่นั้นยังมีข้อจำกัด และไม่ได้ถูกออกแบบและมีการเตรียมพื้นที่เพื่อรองรับข้อจำกัดของผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อม (ชนันต์, 2552) ประกอบกับการศึกษาในด้านที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัยสำหรับผู้สูงอายุชาวไทยที่มีภาวะสมองเสื่อมยังมีอยู่อย่างจำกัด และจากการรวบรวมเอกสารงานวิจัยต่าง ๆ พบว่ามีความแตกต่างทางสรีระ จิตวิทยา การรับรู้และมองเห็นระหว่างคนไทยและคนต่างประเทศที่เห็นได้ชัด ดังนั้นการศึกษาและแนวทางการออกแบบสภาพแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุที่ป่วยเป็นโรคสมองเสื่อมจากต่างประเทศนั้นไม่น่าจะนำมาใช้กับผู้สูงอายุที่ป่วยเป็นโรคสมองเสื่อมชาวไทยได้ (Bergamin *et al*., 1998) การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมการใช้อาคาร อุปสรรคและข้อจำกัดทางกายภาพปัจจุบันของที่พักอาศัยที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูผู้สูงอายุภาวะสมองเสื่อมในประเทศไทย โดยหวังว่าผลการศึกษาครั้งนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อเป็นแนวทางการปรับปรุงสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับผู้สูงอายุชาวไทยที่มีภาวะสมองเสื่อมต่อไป

ระเบียบวิธีวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการสำรวจสภาพแวดล้อมพักอาศัยแบบเดี่ยวไม่ต่ำกว่า 30 กรณีศึกษา โดยใช้สภาพแวดล้อมจริงในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลและส่วนภูมิภาค โดยนำปัจจัยของสภาพแวดล้อมภายในที่พักอาศัยรวม อาทิเช่น แสง สี วัสดุและสัญลักษณ์มาทดสอบ โดยผู้วิจัยและผู้ช่วยวิจัยไปเยี่ยมผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมที่บ้านเพื่อสังเกตและถ่ายภาพลักษณะสภาพแวดล้อม (Figure 1) โดยรายละเอียดระเบียบวิธีวิจัยมีดังนี้

1. การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างจากการคัดกรองโดยใช้แบบประเมินภาวะสมองเสื่อม เน้นการเก็บข้อมูลเฉพาะผู้สูงอายุที่มีรูปแบบที่อยู่อาศัยเป็นประเภทบ้านเดี่ยว ในเขตกรุงเทพมหานครและต่างจังหวัด ใช้เครื่องมือในการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามเชิงลึก (In-depth Interview) กับผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมและผู้ดูแล ซึ่งในการศึกษาจะใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 ตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางด้าน สังคม เศรษฐกิจ การประเมินความสามารถในการประกอบกิจวัตรประจำวัน (ADL&IADL) ของผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อม สภาพแวดล้อมการอยู่อาศัย และปัญหาการอยู่อาศัย เพื่อพัฒนารูปแบบของอาคารที่พักอาศัยและสิ่งอำนวยความสะดวกของผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมในบ้านเดี่ยวต่อไป

2. การสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่องมือในการเก็บตัวอย่าง ได้แก่ แบบสัมภาษณ์จากโครงการวิจัยการพัฒนาสภาพแวดล้อมภายในที่พักอาศัยเพื่อการฟื้นฟูผู้สูงอายุภาวะสมองเสื่อม ที่บันทึกเสียง และกล้องถ่ายรูป โดยทำการสำรวจและสัมภาษณ์กับผู้ดูแลและผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อม

การสำรวจดำเนินการในระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 – เดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 โดยได้ทำการเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมที่พักอาศัย แบบเดี่ยว รวมถึงการสอบถามด้วยแบบสัมภาษณ์และแบบประเมินสภาพแวดล้อมจริงกับผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อม ผู้ดูแลผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมทั้งแบบใกล้ชิดและผู้ร่วมอาศัย หลังจากนั้นข้อมูลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาสภาพแวดล้อมภายในและสิ่งอำนวยความสะดวกที่เหมาะสมของที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมต่อไป

Figure 1 Examples of surveyed houses.

ผลการวิจัย

ในการศึกษาสภาพแวดล้อมภายบ้านพักอาศัยแบบเดี่ยวจำนวน 30 หลัง สามารถสรุปได้ดังนี้ ส่วนที่ 1 คุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคม พบว่า ส่วนใหญ่ผู้สูงอายุเป็นเพศหญิง อายุ 60-65 ปี สถานะภาพสมรส ระดับการศึกษาประถมศึกษา มีโรคประจำตัวคือ ไขมันในเส้นเลือดและความดันโลหิต โดยส่วนที่ 2 พฤติกรรมของโรค พบว่า ผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมส่วนใหญ่ไม่มีภาวะต้องพึ่งพา (ค่าคะแนน ADL เท่ากับ 0/6) ส่วนที่ 3 สภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัย พบว่า เป็นบ้านชั้นเดียว มีห้องนอน ห้องนั่งเล่น/รับแขก ห้องรับประทานอาหารเป็นพื้นที่รวมกับห้องครัว และห้องน้ำ ในส่วนที่ 4 พฤติกรรม/กิจกรรมของผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมและผู้ดูแล พบว่า ส่วนใหญ่จะนอนพักผ่อนและออกกำลังกาย ในส่วนที่ 5 ปัญหาจากการสำรวจและสังเกตและสัมภาษณ์ และส่วนที่ 6 แนวทางในการแก้ปัญหาสภาพแวดล้อมบ้านพักอาศัยเดี่ยวสามารถสรุปได้ดังนี้ ((Table 1, Table 2)

Table 1 Results of overall problems relating to areas and characteristics from most houses of Thai elderly with dementia.

Area	Overall problems relating to areas and characteristics for house Thai elderly with dementia
Living room	1) No curtains for protecting light and sound outside. 2) No circulation supporting elderly with dementia and no handrails. 3) Most windows open to wall with no outside view. 4) No shockproof sheet on furniture for preventing elderly collisions. 5) No activity to support memory.

Table 1 (Continued)

Area	Overall problems relating to areas and characteristics for house Thai elderly with dementia
	6) Narrow space with things on the floor as obstacle. 7) Inappropriate floor material creating slipping problem. 8) No window and very dim environment. 9) Unstable furniture creating accidents.
Bedroom	1) No bell and waring sign on the door that can make alarm when elderly with dementia leaving the room. 2) No environment that can simulate memory such as natural view pictures and family images. 3) No dressing table and chair. 4) Most windows open to wall with no outside view. 5) Too small room for wheelchair access. 7) No space around a bed and no handrail nearby. 8) No shockproof sheet on furniture for preventing elderly collisions.
Toilet	1) Most toilets are far from a bedroom and cannot see the bed. 2) no separation between wet and dry areas (elevate dry area) 3) No anti slip sheet on floor. 4) No shockproof sheet on furniture for preventing elderly collisions. 5) Most doors can be locked 6) No automatic water on-off system. 7) No handrails inside the room for protecting falls. 8) Similar colour for all body of sanitary wares. 10) No cupboard to store dangerous things. 11) No use of soap with rope sticked to handrail. 12) Too small area of toilet responding to wheelchair and caregiver.
Kitchen	1) No counter with shockproof sheet for preventing elderly collisions 2) Very dark at night. 3) Too small area responding to wheelchair and caregiver. 4) No cupboard to store dangerous things. 5) No air cleaner. 6) No handrails inside the room for protecting falls. 7) Inappropriate floor material creating slipping problem when being wet. 9) No separation between a dining room and a kitchen.

Table 1 (Continued)

Area	Overall problems relating to areas and characteristics for house Thai elderly with dementia
Dining room	1) Dining room cannot see from living room. 2) No decoration in the dining room to be different from other rooms. No Installation of labels and signage for illustrate type of kitchenware. 3) No table cover having colour contrast to placemat. 4) Most chairs having no armrest. 5) No handrails inside the room for protecting falls. 6) Too small area responding to wheelchair. 7) Most windows open to wall with no outside view. 8) Most cupboards with no lock. There are direct access from most dining room to kitchen.
Outdoor environment	1) No outside garden decorating with flowers and trees that create comfortable and shady environment for warm feeling and promoting memory. 2) Too small areas for garden. 3) Many obstacles on the floor of outdoor space. 4) Most houses have no trees for shading outside
Corridor	1) No handrails in the corridor for protecting falls. 2) No labels and signage for wayfinding to other areas. 3) No decoration of natural-view pictures and family images on walls. 4) Many obstacles on the floor in the corridor.

Table 2 Results of overall house improvements appropriate for Thai elderly with dementia .

Area	The renovation issues appropriate for Thai elderly with dementia
Living room	1) Use vivid colour of wall with pictures or small trees inside the room. 2) Storing things in a cupboard. No obstacles on the floor in the room.
Bedroom	1) Create environment supporting memory for elderly with dementia such as installing natural-view pictures and family images on walls. 2) Extending size of the room responding to wheelchair. 3) Installing handrails inside the room for protecting falls and installing shockproof sheet on furniture for preventing elderly collisions.
Toilet	1) Separate wet and dry area (elevate dry area) 2) Use anti slip sheet on floor. 3) Installing shockproof sheet on furniture for preventing elderly collisions. 4) Installing handrails inside the room for protecting falls. 5) Decorate relaxing atmosphere such as using music and aromatherapy. 6) Storing dangerous things in a cupboard such as toilet cleaner. 7) Extending area of toilet responding to wheelchair and caregiver.
Kitchen	1) Installing counter with shockproof sheet for preventing elderly collisions 2) Storing dangerous things in a cupboard such as sharp objects. 3) Installing air cleaner. 4) Installing handrails inside the room for protecting falls. 5) Separate a dining room and a kitchen.
Dining room	1) Decorate the dining room to be different from other rooms. Installing labels and signage for illustrate type of kitchenware. 2) Installing handrails inside the room for protecting falls. 3) Storing dangerous things in a cupboard with lock.
Outdoor environment	1) Use outside garden decorating with flowers and trees that creates comfortable and shady environment for warm feeling and promoting memory. 2) Storing things in a cupboard. No obstacles on the floor of outdoor environment.

Table 2 (Continued)

Area	The renovation issues appropriate for Thai elderly with dementia
Corridor	1) Installing handrails in the corridor for protecting falls.
	2) Installing labels and signage for wayfinding to other areas.
	3) Installing natural-view pictures and family images on walls.
	4) Storing things in a cupboard. No obstacles on the floor in the corridor.

ผลการศึกษาจากการสัมภาษณ์ผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมและผู้ดูแลผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมทั้งแบบใกล้ชิดและผู้ร่วมอาศัยของบ้านในอนาคตที่เหมาะสม (Table 2) พบว่า ผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมและผู้ดูแลต้องการระบบความปลอดภัยในด้านความช่วยเหลือในกรณีเกิดอุบัติเหตุ เช่น หกล้ม เจ็บป่วย เป็นต้น ต้องการบริเวณสวนขนาดเล็กไว้ช่วยผ่อนคลาย โดยภายในบ้านมีการใช้สีของผนังเป็นโทนสีสดใส มีติดรูปภาพหรือต้นไม้ขนาดเล็กที่สามารถปลูกในบ้านได้ เพื่อให้มองแล้วเกิดความสบายตา และมีการแยกห้องเป็นสัดส่วนอย่างชัดเจน เช่น ห้องนอน ห้องครัว ห้องนั่งเล่น/รับแขกเพื่อความเป็นส่วนตัว รวมถึงควรมีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากการล้มของผู้สูงอายุ และบรรยากาศของภายในบ้านต้องตกแต่งด้วยสีสัน สดใส เพื่อเพิ่มการจดจำแก่ผู้อาศัยหรือผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อม ในส่วนของพื้นที่ใช้สอยควรรวมกันเป็นพื้นเดียว ห้องนอน ห้องน้ำ ห้องรับประทานอาหาร เป็นต้น เนื่องจากผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมอาจจะจำทางในพื้นที่ต่างๆ ของบ้านไม่ได้ ด้านสภาพแวดล้อมควรให้คล้ายกับบ้านหลังเดิมของผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมมากที่สุด แต่เพิ่มสิ่งอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมแทน และทุกห้องต้องไม่มีที่ล็อคประตู เนื่องจากหากเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินผู้ดูแลสามารถเข้าไปช่วยเหลือได้ทันเวลา

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมการใช้อาคาร อุปสรรคและข้อจำกัดทางกายภาพปัจจุบันของที่พักอาศัยที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูผู้สูงอายุภาวะสมองเสื่อมในประเทศไทย ผลการศึกษาสรุปได้ว่าสภาพแวดล้อมบ้านพักอาศัยแบบเดี่ยวโดยภาพรวมผู้สูงอายุที่มีภาวะสมองเสื่อมและผู้ดูแลต้องการสภาพแวดล้อมของบ้านในส่วนต่าง ๆ ที่มีแนวความคิดโดยภาพรวมคือ บรรยากาศที่ส่งเสริมความทรงจำและอุปกรณ์ช่วยให้เกิดความปลอดภัยในการอาศัยกรณีเกิดอุบัติเหตุ เช่น หกล้ม เจ็บป่วย และด้วยข้อจำกัดทางด้านเวลาการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสำรวจกรณีศึกษาบ้านเดี่ยว 30 กรณีศึกษา ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลและในเขตภาคกลางตอนล่าง รวมถึงภาคเหนือ อย่างไรก็ตามยังไม่ได้มีการศึกษาในเขตภาคอื่น ๆ อาทิ ภาคอีสานและภาคใต้ ดังนั้นเพื่อสามารถสรุปผลการศึกษาได้ครอบคลุมมากขึ้น ควรมีการศึกษาในพื้นที่ในเขตภาคอื่น ๆ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของชุดโครงการวิจัยการพัฒนาสภาพแวดล้อมภายในที่พักอาศัยเพื่อการฟื้นฟูผู้สูงอายุภาวะสมองเสื่อมและภาวะซึมเศร้า ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข (สวรส.)

เอกสารอ้างอิง

จันทร์ชัย เจรียงประเสริฐ และชาดา คำนวณ. 2544. **โรคอัลไซเมอร์และภาวะสมองเสื่อม: คำถามที่คุณมีคำตอบที่คุณต้องการ**. หน้าต่างสุขภาพ, กรุงเทพฯ.

ชนันต์ แสงสีดา. 2552. **สภาพการอยู่อาศัยในที่อยู่อาศัยประเภทบ้านเดี่ยวของผู้สูงอายุที่มีภาวะ-สมองเสื่อม: กรณีศึกษาสมาชิกสมาคมผู้ดูแลผู้ป่วยสมองเสื่อมแห่งประเทศไทยในเขตกรุงเทพมหานคร.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Bergamin, O., A. Schoetzau, K. Sugimoto and M. Zulauf. 1998. The influence of iris color on the pupillary light reflex. **Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology** 236(8): 567-70.

Department of Health. 2015. **Health Building Note 08-02 Dementia-friendly Health and Social Care Environments** (Online). https://assets.publishing.service.gov.uk/government /uploads/system/uploads/attachment_data/file/416780/HBN_08-02.pdf

Marquardt, G. 2011. Wayfinding for people with dementia: A review of the role of architectural design. **HERD** 4(2): 75-90.

Marquardt, G. and P. Schmieg. 2009. Dementia-friendly architecture: Environments that facilitate wayfinding in nursing homes. **American Journal of Alzheimer's Disease and other Dementias** 24(4): 333-340.

Torrington, J. and P.R. Tregenza. 2007. Lighting for people with dementia. **Lighting Research and Technology** (39): 81–97.

ต้นทุนที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามการออกแบบเบื้องต้น

Cost Optimization of the Reinforced Concrete Columns according to Preliminary Design

ไพจิตร ผาวัน[1] **วริสรา เลิศไพฑูรย์พันธ์**[1*] และ ศิรินภาพร เกตุพันธ์[2]

Paijit Pawan[1], Warisara Lertpaitoonpan[1*] and Sirinapaporn Ketphan[2]

บทคัดย่อ

การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในงานออกแบบโครงสร้าง เพราะเสาต้องรับน้ำหนักจากคาน พื้นและผนัง หากการออกแบบคำนึงถึงทางเลือกทุกทางที่เป็นไปได้ ก็จะได้ระบบโครงสร้างที่ประหยัด บทความนี้จึงเสนอแนวคิดการออกแบบร่างทางเลือกหน้าตัดเสา และคาน โดยคำนึงถึงความปลอดภัยและประหยัดเป็นหลักในการพิจารณา ด้วยการวางตำแหน่งเสาที่เป็นไปได้ 3 รูปแบบ คือ (1) วางตำแหน่งเสาตรงตามแบบสถาปัตย์ (2) วางคานแนวตั้ง และเพิ่มเสาตามการวางแนวคาน แต่ยังคงรูปแบบความต้องการของสถาปัตย์ (3) วางตำแหน่งเสาตามแบบสถาปัตย์ และเพิ่มคานฝากแนวนอนตามหลักวิศวกรรม พบว่า การวางตำแหน่งเสาตามรูปแบบที่ 2 มีราคาต่ำที่สุด คือ ราคา 803 บาทต่อเมตร โดยมีขนาดหน้าตัดต่ำสุด 25x25 ตารางซนติเมตร และหน้าตัดคานที่ 25x60 ตารางซนติเมตร ที่ราคา 930 บาทต่อเมตร จึงเป็นวิธีที่ควรแนะนำให้วิศวกรรุ่นใหม่นำไปใช้ในการออกแบบ

ABSTRACT

The design of reinforced concrete columns is a very important part of structural design because the columns must support the weight of beams, floors and walls. If the design considers all options, it will result in economical structural systems. This article therefore introduces alternative draft design methods, By considering the positioning of the columns, 3 possible layout patterns were created, which are; (1) positioning the columns to exactly as the architecture (2) Vertical beams. And add columns according to the beam orientation but still the architecture needs of the architecture (3) Position the pole according to the architecture add horizontal beams according to engineering. Found that the positioning of the pillars in the form 2 is the lowest price is 803 baht per meter, with a minimum cross section of 25 x 25 square meters. And the cross-section at 25 x 60 square meters at 930 baht per meter. It showed is a method that new engineers should be guided to use in preliminary design.

Key words: cost optimization, preliminary concrete column design, working stress design

* Corresponding author; email address: **warisara.le@spu.ac.th**

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Civil Engineering and Urban Development, School of Engineering, Sripatum University, Bangkok, Thailand 10900

[2] นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ 10900

[2] Graduate student, Department of Civil Engineering and Urban Development, School of Engineering, Sripatum University, Bangkok

คำนำ

การออกแบบเบื้องต้น (Preliminary Design) เป็นขั้นตอนที่สำคัญของการออกแบบโครงสร้าง เนื่องจากเป็นการกำหนดตำแหน่ง และรูปแบบโครงสร้างให้สอดคล้องกับความต้องการที่กำหนดโดยแบบสถาปัตยกรรม ซึ่งคำนึงถึงความสวยงามและประโยชน์ใช้สอยเป็นหลัก ในการออกแบบเบื้องต้นที่ดีควรเริ่มจากวางแนวความคิดตามขั้นตอนเป็นอันดับแรก คือ การออกแบบร่างทางเลือก (Schematic Design) (Carter and Bouassida, 2013) ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างอาคาร ได้แก่พื้น คาน เสา และฐานราก เพื่อให้มีจำนวนทางเลือกหลากหลายทางเลือก เหมาะสม (Optimization) กับรูปแบบสถาปัตยกรรม ดังนั้นการออกแบบร่างทางเลือกที่ดี จึงควรพิจารณาทางเลือก กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ และวางผังโครงสร้างอย่างง่าย (Lay-out Plan) ให้สอดคล้องกันระหว่างแบบสถาปัตยกรรม และแบบวิศวกรรมโครงสร้าง จากนั้นเข้าสู่การออกแบบรายละเอียด (Detail Design) (Dantzing, 1963, Estrada et al. 2006) ตัวอย่างแสดง (Figure 1(a), 1(b))

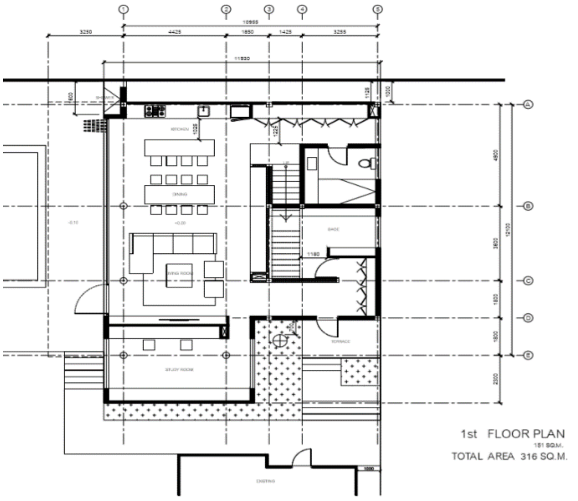


Figure 1 Architectural plan (a)

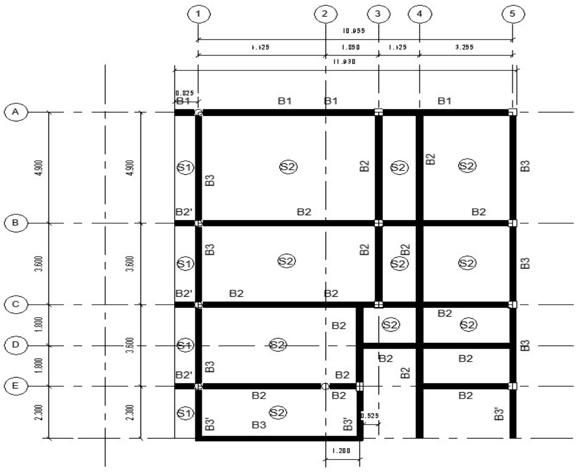


Figure 1 Structural plan (b).

วิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้าง (Designer) มักจะออกแบบร่าง (Estrada *et al.* 2006) เพียงรูปแบบเดียวแล้วกำหนดขนาดหน้าตัด โดยไม่ได้มีทางเลือกอื่นมาเปรียบเทียบ ซึ่งอาจส่งผลให้ระบบโครงสร้างอาคารไม่ประหยัดและไม่ปลอดภัย ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่นักออกแบบโครงสร้างจะต้องพิจารณาแบบร่างทางเลือกหลายๆ ทางเลือก ซึ่งขั้นตอนการออกแบบร่างทางเลือกจะต้องปรับผลการออกแบบด้วยการลดขนาดหรือเพิ่มขนาดโครงสร้าง แต่ไม่สามารถกล่าวได้ว่าผลการออกแบบสุดท้ายมีความประหยัดที่สุด (Muhammad) เพราะไม่มีการพิจารณาราคาวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของโครงสร้าง (Mccormac, 1993, Qi and Mimura, 2002) เพื่อลดข้อด้อยจากกระบวนการการออกแบบ วิศวกรผู้ออกแบบควรพิจารณาแบบร่างทางเลือกให้หลากหลายเพื่อพิจารณาทางเลือกที่ดีที่สุด ดังนั้นบทความนี้จึงได้พัฒนากรอบงานการออกแบบร่างทางเลือกในการกำหนดตำแหน่งเสาอย่างง่าย โดยพิจารณาแนวคานร่วมด้วย ซึ่งออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ตามมาตรฐาน ACI 318-14

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน เป็นมาตรฐานกลางในการออกแบบของวิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้าง เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความมั่นคงแข็งแรง และปลอดภัย โดยจะกล่าวถึงเนื้อหาที่สำคัญ 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์โครงสร้าง และการคำนวณออกแบบ

การวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาแรงปฏิกิริยา แรงเฉือน โมเมนต์ดัด และแรงบิด สำหรับนำไปใช้งานในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างในช่วงอีลาสติก (Elastic analysis) กรณีที่เป็นโครงสร้างแบบดีเทอร์มิเนท (Determinate Structure) สามารถวิเคราะห์หาแรงต่างๆ ได้ด้วยสมการสมดุล สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนท (Indeterminate Structure) ที่เป็นพื้นหรือคานต่อเนื่องที่มีหน้าตัดคงที่ และมีช่วงตั้งแต่สองช่วงขึ้นไป มีความต่างของความยาวช่วงที่ติดกันไม่เกินร้อยละ 20 น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสม่ำเสมอเต็มทุกช่วงตลอดความยาวของโครงสร้าง และมีน้ำหนักบรรทุกจร (LL) ไม่เกินสามเท่าของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) หากไม่คำนวณหาโมเมนต์และแรงเฉือนโดยการวิเคราะห์อย่างละเอียด มาตรฐาน ACI 318-14 ให้ใช้สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์และแรงเฉือนได้ดังนี้ (Table 1)

Table 1 Coefficient of Moment and Shear (ACI 318-14).

Moment	Location	Condition	Coefficient of Moment
Positive	End span	Discontinuous end integral with support	(1/14) wL^2
		Discontinuous end unrestrained	(1/11) wL^2
	Interior Span	All	(1/16) wL^2
Negative	Interior face of exterior support	Member built integrally with supporting spandrel	(1/24) wL^2
		Member built integrally with supporting column	(1/16) wL^2
	Exterior face of first interior support	Two spans	(1/9) wL^2
		More than two spans	(1/10) wL^2
	Face of other supports	All	(1/11) wL^2
	Face of all support satisfying (a) or (b)	(a) Slab with span not exceeding 10 ft (b) Beam where ratio of sum of column stiffnesses to beam stiffness exceeds 8 at each end of span	(1/12) wL^2

การคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การคำนวณออกแบบโครงสร้าง คือ ขั้นตอนการเลือกใช้วัสดุ และเลือกขนาดหน้าตัดของส่วนประกอบต่างๆ ทางโครงสร้าง เพื่อให้องค์อาคารมีเสถียรภาพมั่นคง และใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design: WSD) จะใช้หน่วยแรงไม่เกินกว่าค่าพิกัดยืดหยุ่นของวัสดุ หน่วยแรงของวัสดุที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกขณะใช้งาน (Working stress) ไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress) เป็นหลักเกณฑ์ในการออกแบบ เช่น หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ที่ผิวของคอนกรีต : fc = 0.45 fc’ และ หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเส้นกลม ชั้นคุณภาพ SR24 : fs = 0.5 fy เป็นต้น สำหรับกรณีเสาสั้น แบบเสาปลอกเดี่ยว รับแรงตามแนวแกนอย่างเดียว ดังสมการ (1)

$$P = 0.85\ (0.25fc'\ (Ag - Ast) + fs\ Ast) \quad (1)$$

การพัฒนากรอบงานการออกแบบร่างทางเลือกในการกำหนดตำแหน่งเสาอย่างง่าย

ขั้นตอนการพัฒนากรอบงานการออกแบบร่างทางเลือกในการกำหนดตำแหน่งเสาอย่างง่าย มีขั้นตอนการออกแบบโครงสร้าง จากแบบสถาปัตยกรรม (Figure 2) ดังนี้

1. กำหนดตำแหน่งของเสาตามกริดไลน์ (Grid line) ในแบบสถาปัตยกรรม

2. พิจารณาเงื่อนไขการใช้งานของพื้นที่ตามแบบสถาปัตยกรรม

3. พิจารณาเงื่อนไขทางวิศวกรรม เช่น การวางตำแหน่งเสาต้องคำนึงถึงประโยชน์การใช้สอย ร่วมกับความสามารถรับน้ำหนักของวัสดุที่ใช้สอย หากวางเสาถี่มากก็จะทำให้หน้าตัดโครงสร้างที่รับพื้นที่และคานเล็กลงได้ หรือหากต้องการห้องกว้าง ต้องลดจำนวนเสาและต้องเพิ่มความห่างของช่วงเสา ซึ่งจะประหยัดจำนวนเสาแต่ขนาดหน้าตัดของคานจะเพิ่มขึ้น

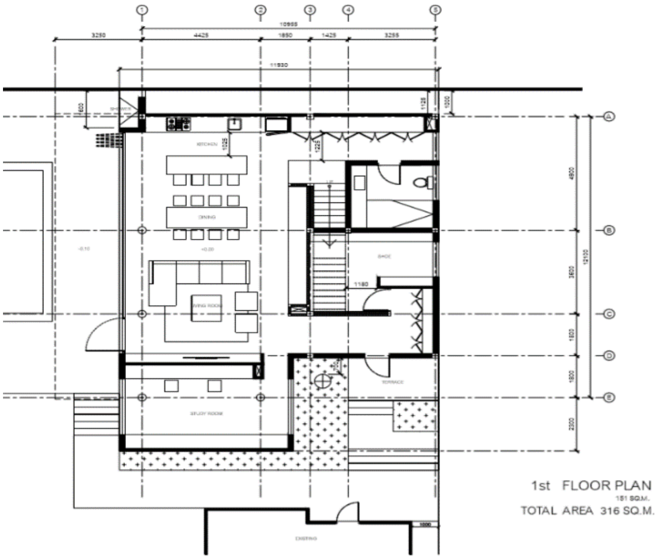


Figure 2 The 1st floor architectural plan.

- ผังทางเลือกรูปแบบที่ 1 วางตำแหน่งเสาตรงตามแบบสถาปัตยกรรม (Figure 3)

- ผังทางเลือกรูปแบบที่ 2 วางคานแนวตั้งระหว่าง Grid line ที่ 1 และ 3 และเพิ่มเสาตามการวางแนวคาน ยังคงรูปแบบความต้องการของสถาปัตยกรรมเช่นกัน (Figure 4)

- ผังทางเลือกรูปแบบที่ 3 วางตำแหน่งเสาตามแบบสถาปัตยกรรม เพิ่มคานฝากแนวนอน (Figure 5)

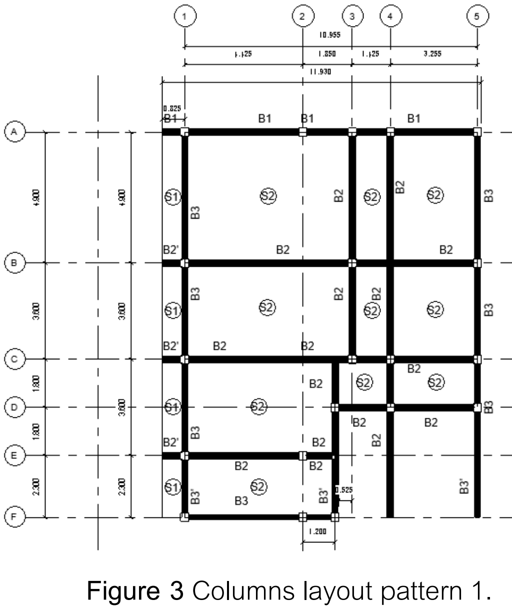


Figure 3 Columns layout pattern 1.

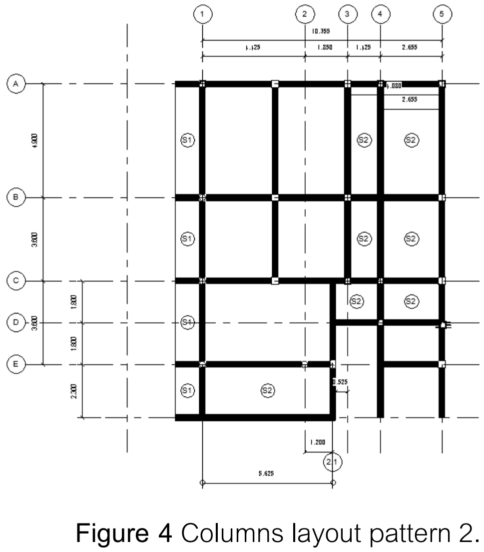


Figure 4 Columns layout pattern 2.

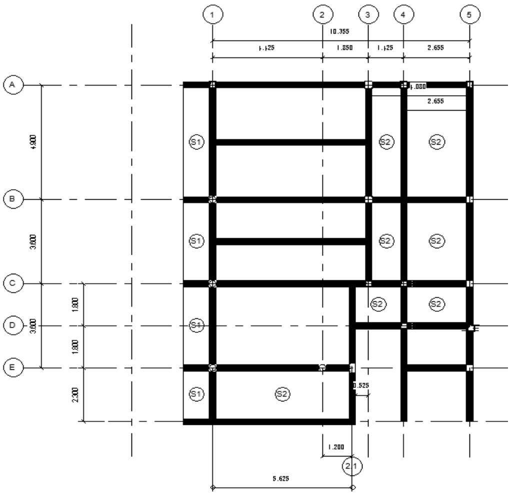


Figure 5 Columns layout pattern 3.

โดยในรูปแบบที่ 1-3 ต้องการเปรียบเทียบระยะในการวางเสา และคำนึงถึงคานว่ามีความปลอดภัยและมีความประหยัดมากกว่ากันหรือไม่

4. พัฒนาแบบจำลองการออกแบบร่างทางเลือกในการกำหนดตำแหน่งเสาอย่างง่าย (Table 2- Table 3)

Table 2 Design beam and column.

Design	Section	Span (m)								
		3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
EIT standard	D (cm)	30	35	40	45	50	50	60	60	70
	B (cm)	15	15	20	20	25	25	30	30	35
	H (cm)	15	15	20	20	25	25	30	35	35
Design beam	As (cm^2)	3	3	4	4	10	6	15	15	20
	As’ (cm^2)	-2	-2	-4	-4	-7	-6	-11	-10	-16
Design column	Ast (cm^2)	9.69	9.69	5.02	5.02	-0.98	-0.98	-8.31	-12.31	-16.98

Table 3 Cost of beam and column.

Member	Structural work	Span (m)								
		3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
Beam	Concrete	0.045	0.053	0.080	0.090	0.125	0.125	0.180	0.180	0.245
	Formwork	0.75	0.85	1.00	1.10	1.25	1.25	1.50	1.50	1.75
	Rebar	1.04	1.54	-0.59	-0.24	2.71	-0.37	3.37	4.60	4.17
	Cost	502	584	639	721	970	862	1228	1271	1511
Column	Concrete	0.02	0.02	0.04	0.04	0.06	0.06	0.09	0.11	0.12
	Formwork	0.60	0.60	0.80	0.80	1.00	1.00	1.20	1.30	1.40
	Rebar	9.69	9.69	5.02	5.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Cost	684	684	656	656	625	625	780	860	945
	Total cost	1186	1268	1295	1377	1595	1487	2008	2131	2456

* cost shown in unit of THB per meter length of beam or column

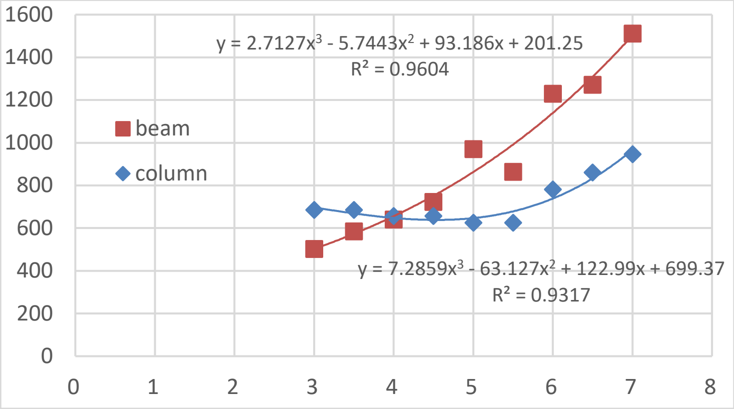


Figure 6 Columns-Beam Optimization Model.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากแบบจำลอง Columns-Beam Optimization Model (Figure 6) จะทราบว่าควรออกแบบเสาและคานโดยกำหนดช่วงระหว่างเสา (Span) ยาวเท่าไรจึงจะประหยัดที่สุด จากนั้นจึงนำมามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเสาและคาน พร้อมทั้งคำนวณราคาเหล็กเสริม คอนกรีต ไม้แบบ และราคารวมของแต่ละหน้าตัดของเสาและคานโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel (Table 4 – Table 9) โดยพิจารณาที่ Grid line B

เมื่อคำนวณราคาของเสาและคานแต่ละหน้าตัดจากการวางผังทั้ง 3 รูปแบบ พล็อตกราฟเพื่อแสดงราคาที่ถูกที่สุด (Figure 7) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ราคาในการวางแนวเสาที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบนั้นจะแตกต่างกัน รูปแบบที่ 1 มีราคาสูงที่สุด เนื่องจากวางผังเสาในระยะห่างทำให้หน้าตัดของเสาและหน้าตัดคานสูงตามไปด้วย รูปแบบที่ 2 จะมีราคาถูกกว่ารูปแบบที่ 1และ3 ในการเพิ่มตำแหน่งเสาจะได้เสาที่หน้าตัดเล็กลงและมีพื้นที่รับผิดชอบน้อยลงทำให้คานจึงมีขนาดเล็กตาม รูปแบบที่ 3 จะมีราคาใกล้เคียงกับรูปแบบที่ 2 แต่ราคาเสาและคานสูงขึ้น ซึ่งทำให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถตัดสินใจเลือกได้ว่าจะวางผังเสาในรูปแบบใด (เช่น วางผังเสาในรูปแบบที่ 2 จะได้เสาขนาดหน้าตัดต่ำสุด 25 ซม.✕ 25 ซม. โดยมีราคาค่าใช้จ่าย 803 บาทต่อเมตร และหน้าตัดคาน 25 ซม.x 60 ซม. โดยมีราคาค่าใช้จ่าย 930 บาทต่อเมตร) จะทำให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โดยยังคงมีความแข็งแรงปลอดภัยตามมาตรฐานวิศวกรรม

Table 4 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed column according to layout pattern 1

Column section		DB16						Total cost
Width (B)	Length (H)	Ratio B/H	Pc (kg)	Ast (cm^2)	concrete	reinforcement	formwork	
30	30	1.00	28,688	(8.87)	207	92.79	45	1034.36
30	35	0.86	33,469	(12.17)	241.5	92.79	52.5	1160.36
30	40	0.75	38,250	(15.48)	276	92.79	60	1286.36
30	45	0.67	43,031	(18.79)	310.5	92.79	67.5	1412.36
30	50	0.60	47,813	(22.10)	345	92.79	75	1538.36
30	55	0.55	52,594	(25.41)	379.5	92.79	82.5	1664.36
30	60	0.50	57,375	(28.72)	414	92.79	90	1790.36
30	65	0.46	62,156	(32.03)	448.5	92.79	97.5	1916.36
30	70	0.43	66,938	(35.34)	483	92.79	105	2042.36

Table 5 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed beam according to layout pattern 1.

Beam section		B/H	M_{max}	M_c	As	Cost			Total cost
Width	Length	Ratio	(kg-m)	(kg-m)	(cm^2)	reinforcement	concrete	formwork	
30	60	0.50	17064	14095	25.27	456	414	330	1200
30	65	0.46	17254	16774	19.70	355	448.5	361	1165
30	70	0.43	17444	19686	17.84	322	483	395	1200

Table 6 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed column according to layout pattern 2.

Column section		DB16						Total cost
Width (B)	Length(H)	Ratio B/H	Pc (kg)	Ast (cm^2)	concrete	reinforcement	formwork	
25	25	1.00	19,922	0.00	143.75	92.79	31.25	803.36
25	30	0.83	23,906	(2.76)	172.5	92.79	37.5	908.36
25	35	0.71	27,891	(5.51)	201.25	92.79	43.75	1013.36
25	40	0.63	31,875	(8.27)	230	92.79	50	1118.36
25	45	0.56	35,859	(11.03)	258.75	92.79	56.25	1223.36
25	50	0.50	39,844	(13.79)	287.5	92.79	62.5	1328.36
25	55	0.45	43,828	(16.54)	316.25	92.79	68.75	1433.36
25	60	0.42	47,813	(19.30)	345	92.79	75	1538.36

Table 7 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed beam according to layout pattern 2.

Beam section		B/H	M_{max}	M_c	As (cm^2)	Cost			Total cost
Width	Length	Ratio	(kg-m)	(kg-m)		reinforcement	concrete	formwork	
25	50	0.50	11925	7863	26.53	478	287.5	250	1016
25	55	0.45	12084	9707	20.41	368	316.25	276	961
25	60	0.42	12242	11746	15.52	280	345	305	930
25	65	0.38	12400	13978	13.73	248	373.75	336	958
25	70	0.36	12559	16405	12.93	233	402.5	370	1006

Table 8 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed column according to layout pattern 3.

Column section		DB16						Total cost
Width (B)	Length(H)	Ratio B/H	Pc (kg)	Ast (cm^2)	concrete	reinforcement	formwork	
25	25	1.00	19,922	7.49	143.75	108.55	31.25	850.65
25	30	0.83	23,906	4.73	172.5	92.79	37.5	908.36
25	35	0.71	27,891	1.97	201.25	92.79	43.75	1013.36
25	40	0.63	31,875	(0.78)	230	92.79	50	1118.36
25	45	0.56	35,859	(3.54)	258.75	92.79	56.25	1223.36
25	50	0.50	39,844	(6.30)	287.5	92.79	62.5	1328.36
25	55	0.45	43,828	(9.06)	316.25	92.79	68.75	1433.36
25	60	0.42	47,813	(11.81)	345	92.79	75	1538.36

Table 9 Cost of reinforcement, concrete, and formwork of designed beam according to layout pattern 3.

Beam section		B/H	M_{max}	M_c	As (cm^2)	Cost			Total cost
Width	Length	Ratio	(kg-m)	(kg-m)		reinforcement	concrete	formwork	
25	50	0.50	13847	7863	33.61	606	287.5	250	1144
25	55	0.45	13943	9707	26.32	475	316.25	276	1067
25	60	0.42	14039	11746	20.55	371	345	305	1021
25	65	0.38	14136	13978	15.81	285	373.75	336	995
25	70	0.36	14232	16405	14.57	263	402.5	370	1035

สรุป

เมื่อคำนวณราคาของเสาและคานแต่ละหน้าตัดจากการวางผังทั้ง 3 รูปแบบ พล็อตกราฟเพื่อแสดงราคาที่ถูกที่สุด (Figure 7) จะเห็นได้ว่า ราคาในการวางแนวเสาที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบนั้นจะแตกต่างกัน โดย รูปแบบที่ 1 มีราคาสูงที่สุด เนื่องจากวางผังเสาในระยะห่าง ทำให้หน้าตัดของเสาและคานใหญ่ ส่วนรูปแบบที่ 2 จะมีราคาถูกกว่าอีกสองแบบเพราะเพิ่มเสาจึงมีหน้าตัดเสาเล็กลงและมีพื้นที่รับผิดชอบน้อยลง คานจึงมีขนาดเล็กตาม สำหรับรูปแบบที่ 3 จะมีราคาใกล้เคียงกับรูปแบบที่ 2 แต่ราคาเสาและคานสูงขึ้น ซึ่งทำให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถตัดสินใจเลือกได้ว่าจะวางผังเสาในรูปแบบใด (เช่น วางผังเสาในรูปแบบที่ 2 จะได้เสาขนาดหน้าตัดต่ำสุด 25 ซม.× 25 ซม. โดยมีราคาค่าใช้จ่าย 803 บาทต่อเมตร และหน้าตัดคาน 25 ซม.x 60 ซม. โดยมีราคาค่าใช้จ่าย 930 บาทต่อเมตร) จะทำให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โดยยังคงมีความแข็งแรงปลอดภัยตามมาตรฐานวิศวกรรม

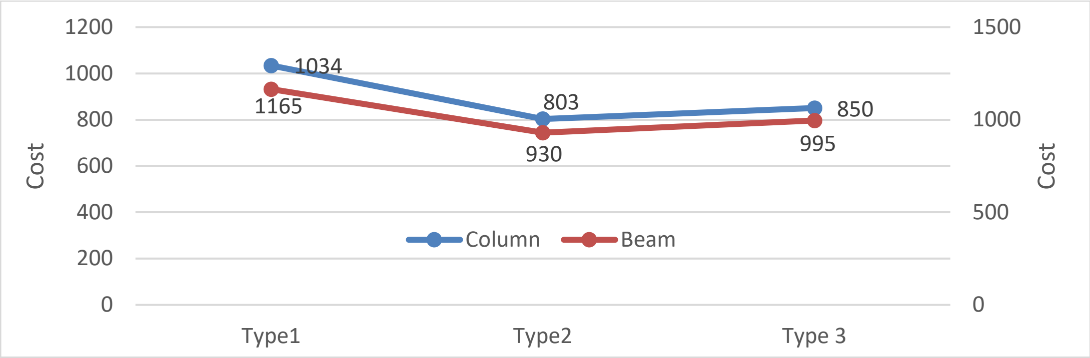


Figure 7 Graph between cost and cross section of column according to 3 layout patterns.

เอกสารอ้างอิง

Carter, J.P. and M. Bouassida. 2013. Optimization of design of column-reinforced foundations. **Journal of Structure Engineering** 14.

Dantzing, G.B. 1963. **Linear Programming and Extensions**, Princeton University Press, pp. 3-5

Estrada, H., J.J. Jimenez and F. Aguíñiga. 2006. **Cost Analysis in the Design of Open-Web Castellated Beams**, Architectural Engineering Conference (AEI), March 29-April 1, Nebraska, United States.

Muhammad, N.S. **Mining and Environment Eng.**, Department of Civil, Faculty of Engineering, University of Wollongong.

Mccormac, J.C. 1993. **Design of Reinforced Concrete**, Harper-Collins College Publishers.

Qi, W. and Mimura, H. 2002. Streamline geometry optimization in beam-column connection, **Journal of Structural Engineering**, 128.

Rafig, M.Y. 1995. **Genetic Algorithms in Optimum Design, Capacity Check and Final Detailing of Reinforced Concrete Columns**. Transactions on the Built Environment, 13.

Soo, K.J., K.Y. Sik and L.S. Hee. 2008. **Structural Schematic Design of a Tall Building in Asan using the Diagrid System.** CTBUH 8th World Congress, March 3-5, Dubai, UAE.

พฤติกรรมรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอ

Flexural Behavior of Jute FRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams

<u>พหลฐวัศ ถนิมพาสน์</u> [1] และ จักรพันธ์ เทือกต๊ะ[1]

<u>Pahonthawat Thanimpas</u>[1] and Chakrapan Tuakta[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล.) ที่เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอ (Jute Fiber-reinforced Polymer; JFRP) โดยการทดสอบตัวอย่างคานจำนวน 6 ตัวอย่าง ที่มีปริมาณเหล็กเสริมแตกต่างกัน และเสริมกำลังรับแรงดัดภายนอกด้วยแผ่น JFRP ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสุญญากาศ (VATRM) และมีจำนวนชั้นแตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าคานคสล.เสริมกำลังด้วย JFRP มีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น 11.76% 10.6% และ 21% เมื่อเปรียบเทียบกับคานที่ไม่เสริมกำลัง เมื่อเสริมกำลังด้วย JFRP 3 ชั้น 6 ชั้น และ 9 ชั้นตามลำดับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการเสริมกำลังจะขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดัดในคาน จากการเปรียบเทียบการคำนวณกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ACI 440.2R พบว่ามีความคลาดเคลื่อนอย่างมาก 4.5%

ABSTRACT

This study investigated the flexural behavior of RC beams externally strengthened with jute fiber-reinforced polymer (JFRP). Test was conducted on six laboratory-sized RC beams with two different steel ratios. Four of the specimens were strengthened by JFRP plate fabricated using the vacuum assisted resin transfer molding technique (VARTM) with three different numbers of jute layer. The experimental results have shown that the flexural strength of JFRP-strengthened RC beams increased by 11.76%, 10.6%, and 21% when the number of jute layers were 3, 6, and 9, respectively. The efficiency of strengthening depended on the amount of existing tensile reinforcement. In addition, the flexural strengths calculated according to ACI 440.2R were at most 4.5% deviating from the test results.

Key words: FLEXURAL BEHAVIOR, JUTE, FRP ,STRENGTHENING, REINFORCED CONCRETE BEAM

*Corresponding author; e-mail address: pahonthawat.t@ku.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of civil engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Polymer Composite; FRP) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการเสริมกำลังและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากมีกระบวนการติดตั้งที่สะดวกรวดเร็ว น้ำหนักเบา และไม่มีปัญหาการกัดกร่อน ซึ่ง FRP ที่พบในท้องตลาดส่วนใหญ่จะผลิตจากเส้นใยคาร์บอน เส้นใยอะรามิด หรือเส้นใยแก้ว เส้นใยเหล่านี้มีกระบวนผลิตที่ใช้ทรัพยากรที่หมดไปได้ ใช้พลังงานสูง และอาจมีของเสียเป็นสารเคมีที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันจึงเริ่มมีความสนใจในการใช้เส้นใยธรรมชาติเพื่อเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ เกิดขึ้นใหม่ได้เองตามธรรมชาติ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

สมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืชขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะส่วนประกอบขั้นพื้นฐานโดยเส้นใยที่มีเซลลูโลสมาก เช่น เส้นใยกัญชง เส้นใยสับประรด และใยปอ จะมีกำลังรับแรงดึงและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่สูง (พฤติพงศ์, 2557) คุณสมบัติเหล่านี้จะมีผลต่อสมบัติของวัสดุประกอบพอลิเมอร์เส้นใยธรรมชาติที่จะนำมาใช้เสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตด้วย Harfizah *et al.* (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอแก้ว (Kenaf Fiber-reinforced Polymer; KFRP) ที่ผลิตด้วยอิพอกซี(Epoxy) ไวนิลเอสเตอร์ (Vinyl ester) หรือโพลีเอสเตอร์(Polyester) ในการเสริมกำลัง ด้วยการทดสอบการรับแรงดัดของคานที่เสริมกำลังด้วยเมทริกซ์เรซินที่ต่างกันกับเส้นใยปอแก้ว จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างคานที่เสริมกำลังด้วย KFRP มีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 40% และมีค่าการโก่งตัวลดลงได้ถึง 24% จึงแสดงให้เห็นว่าสามารถนำไปใช้เสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้จริง

Huang *et al.* (2016) ได้ทำการศึกษาการเสริมกำลังภายนอกคานคสล.ด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยลินิน (Flax Fiber-Reinforced Polymers; FFRP) หาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานยาว 2 เมตร ที่เสริมและไม่เสริมกำลังด้วย FFRP ภายใต้น้ำหนักกระทำสี่จุด (Four Point Bending) ตัวแปรได้แก่ความหนาของ FFRP 4 และ 6 ชั้น และอัตราส่วนของเหล็กเสริมเท่ากับ 0.223% และ 0.503% จากผลการทดสอบบ่งชี้ว่าแผ่น FFRP นั้นจะช่วยทำให้กำลังประลัย การโก่งตัว และความเหนียวของคานคสล.ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัดและความเหนียวนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับคานที่มีอัตราส่วนของเหล็กเสริมน้อยกว่า คานที่เสริมกำลังจะแสดงให้เห็นลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึงกัน เช่น การครากของเหล็กเสริม จากนั้นแผ่น FFRP จะขาด (Rupture)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยธรรมชาติสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดให้กับองค์อาคารคสล.ได้ อย่างไรก็ดียังไม่มีการศึกษาการใช้เส้นใยปอกระเจาในการเสริมกำลังอย่างกว้างขวาง ซึ่งเป็นพืชที่หาได้ง่ายในประเทศไทยและมีสมบัติทางกลที่ดีเมื่อเทียบกับราคางานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเส้นใยปอกระเจามาพัฒนาเป็นวัสดุประกอบสำหรับเสริมกำลังรับแรงดัดในโครงสร้างคอนกรีต

การทดลอง

การเตรียมตัวอย่างคาน

การศึกษานี้ทดสอบตัวอย่างคานคสล.ขนาดหน้าตัด 0.15x0.20 ม. มีความยาว 1.50 ม.จำนวน 6 ตัวอย่าง หล่อด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัด 23 MPa (จากการทดสอบตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน) และใช้เหล็กข้ออ้อยระดับชั้นคุณภาพ SD40 ประเภทของตัวอย่างคานแบบต่างๆ จำแนกตาม (Table 1)

Table 1 RC beams specimens.

Specimen	Bar shape	No. of FRP layers
C2	2xDB12	-
C3	3xDB12	-
F2-L3	2xDB12	3
F2-L6	2xDB12	6
F2-L9	2xDB12	9
F3-L3	3xDB12	3

แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอกระเจา (Jute Fiber-reinforced Polymer; JFRP) ที่ใช้ติดตั้งสำหรับการเสริมกำลังตัวอย่างคานนั้นมีขนาด 0.15x1.10 ม. และมีจำนวนชั้นความหนาของเส้นใยดังที่ได้แสดงไว้ใน (Table 1) แผ่น JFRP ประกอบด้วยเส้นใยปอกระเจาที่ผ่านกระบวนการถักทอเป็นผืนผ้า มีลักษณะทางกายภาพคือ เส้นใยมีสีเหลือง น้ำตาล เทา มีความคืนตัวและทนต่อการขัดถู รวมถึงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ปานกลาง Yan *et al.* (2016) ซึ่งถูกนำมาใช้ทำหน้าที่รับแรงดึง และมีอิพอกซีเรซินแบบ 2 ส่วนเป็นเมทริกซ์ ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) ดังแสดงใน (Figure 1) นำผืนผ้าเส้นใยปอตามขนาดและจำนวนชั้นที่ต้องการใส่ลงในถุงที่ปิดผนึกอย่างดี แล้วจึงใช้ปั้มดูดอากาศออกเพื่อทำให้เป็นสภาพสุญญากาศและดูดอิพอกซีเรซินเข้าไปให้เคลือบแผ่นเส้นใย ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วจึงถอดแผ่น JFRP ออกมาและปล่อยให้บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วันก่อนนำไปใช้งาน

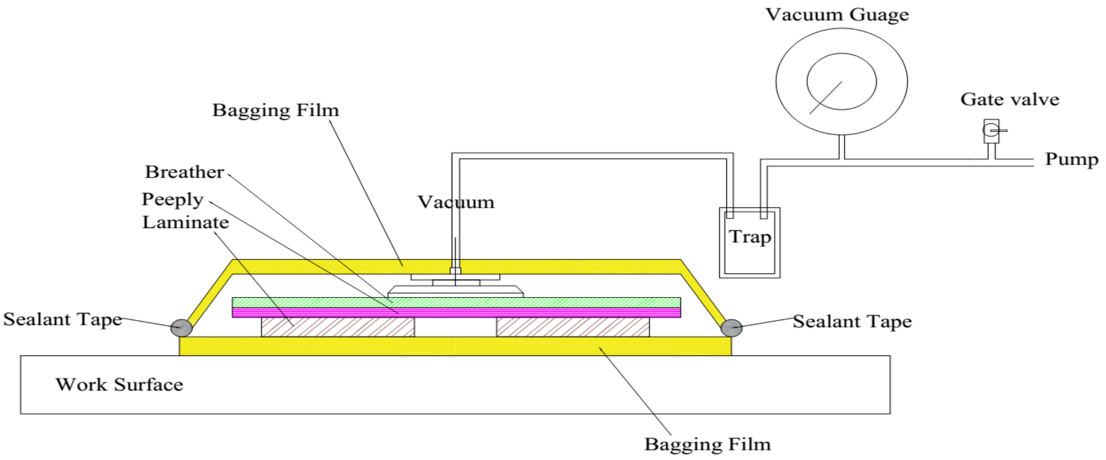


Figure 1 Schematic representation of VARTM process for JFRP manufacturing.

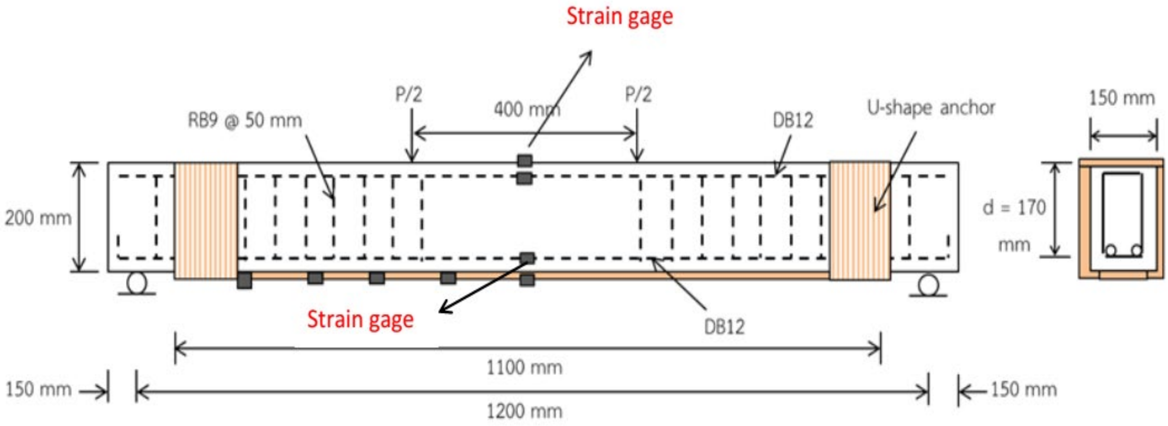


Figure 2 FRP strengthened beam under four-point bending test.

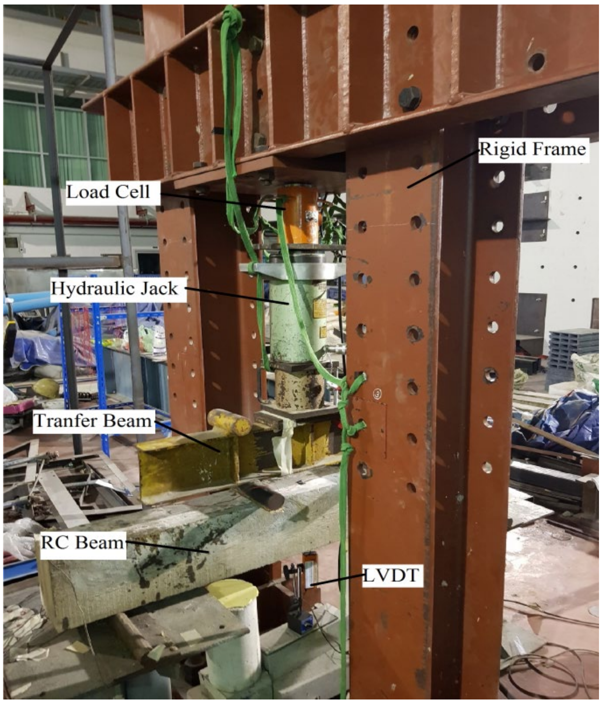


Figure 3 Bending test set-up.

(Figure 2,3) การติดตั้งแผ่น JFRP ที่ท้องคานและตำแหน่งของ Strain gauges ในการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกสี่จุด ในการเตรียมพื้นผิวคอนกรีตที่ท้องคานก่อนการติดตั้งจะต้องเจียผิวให้เรียบโดยขจัดเศษน้ำปูนออกให้หมด แล้วเช็ดทำความสะอาดฝุ่นผงหรือคราบน้ำมันออกให้หมด จากนั้นทาอิพอกซีสำหรับติดตั้งแผ่น JFRP ที่ผิวคอนกรีตแล้วจึงติดแผ่น JFRP ที่เตรียมไว้ตามลงไป ทิ้งให้บ่มเป็นเวลา 7 วันก่อนการทดสอบ

การเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ

(Figure 3) แสดงตำแหน่งการติดตั้งเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบตัวอย่างคานโดยใช้ Load cell ในการวัดน้ำหนักที่กระทำต่อคาน และใช้ LVDT ในการวัดการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน

ทั้งนี้ได้ทดสอบกำลังรับแรงดึงของ JFRP โดยการเตรียมตัวอย่างคูปองที่มีความกว้าง 1.5 ซม. มีความยาว 25 ซม. และใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine; UTM) เพื่อหากำลังรับแรงดึงและระยะยืดสูงสุดแล้วนำไปคำนวณสมบัติทางกล สรุปค่ากำลังต้านทานแรงดึง (Tensile strength;f_{fu}) ความเครียดสูงสุด (Ultimate strain;ε_{fu}) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (E_f) (Table 2) ทั้งนี้ค่าหน่วยแรงคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยในตัวอย่างคูปอง

Table 2 Mechanical propertie of JFRP.

No. of FRP layers	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Maximum strain (mm/mm)	Net-fiber area per unit width (mm^2/mm)
3	1173	73.31	0.016	0.0220
6	1389	57.91	0.024	0.0220

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

พฤติกรรมรับแรงดัด

(Figure 4) แสดงการแจกแจงของความเครียดเชิงดึง (Tensile Strain) ในแผ่น JFRP ที่น้ำหนักบรรทุกประลัยของตัวอย่างคาน โดยเป็นระยะห่างจากกึ่งกลางคาน พบว่าค่าความเครียดเชิงดึงสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณระหว่างจุดที่มีแรงกระทำ เนื่องจากเป็นช่วงที่มีโมเมนต์ดัดมากที่สุด และค่อยๆลดลงที่ปลายแผ่น JFRP ด้านใกล้กับจุดรองรับ ทั้งนี้ความเครียดสูงสุดใน JFRP ของแต่ละตัวอย่างคานภายใต้สภาวะบรรทุกประลัยเท่ากับ 0.008681 mm/mm, 0.004778 mm/mm, 0.005536 mm/mm, และ 0.004378 mm/mm. ในตัวอย่าง F2-L3, F2-L6, F2-L9, และ F3-L3 ตามลำดับ

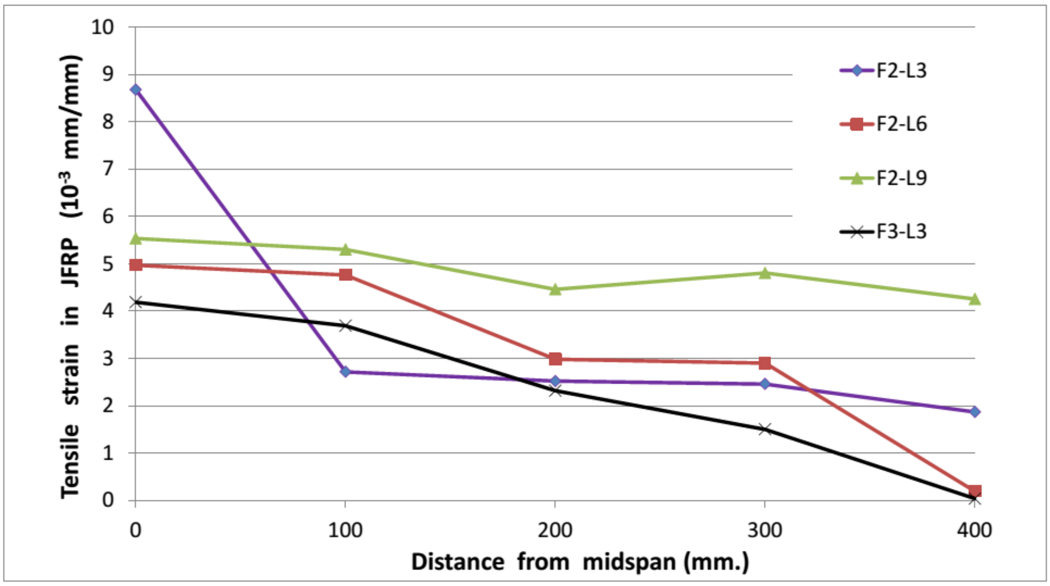


Figure 4 Strain distribution in FRP.

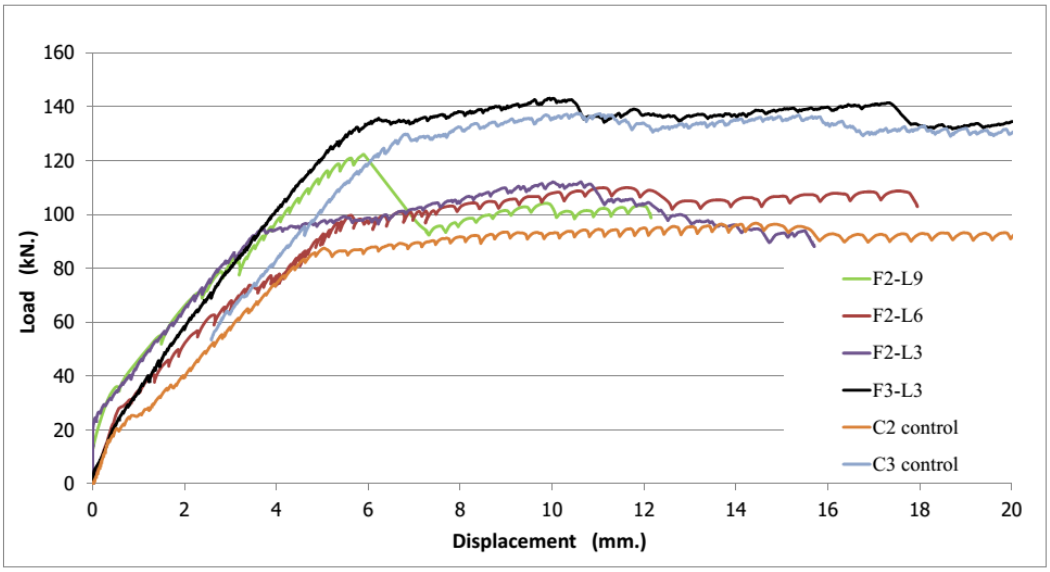


Figure 5 Load vs midspan deflection relationship of all specimens.

เมื่อเปรียบเทียบความชันของกราฟในช่วงก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดการคราก พบว่าตัวอย่างคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึง DB12 จำนวน 3 เส้น $(\rho = 0.0129)$ มีค่าความแข็งแกร่ง(stiffness) มากกว่าตัวอย่างที่มีเพียง 2 เส้น $(\rho = 0.0086)$ ไม่ว่าจะเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังหรือไม่ก็ตาม

คานตัวอย่าง C2,F2-L3,F2-L6 และ F2-L9 พบว่ากำลังรับแรงดัดที่สภาวะประลัยของคานควบคุม(C2) เท่ากับ 96.84 kN เมื่อถูกเสริมกำลังด้วย FRP จำนวน 3,6 และ 9 ชั้น มีกำลังรับแรงดัดที่สภาวะประลัย 112.15,110.95 และ 122.28 kN เปรียบเทียบกับคาน F2 พบว่ามีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น 11.76%,10.6% และ 21.57% ตามลำดับ

คานควบคุม (C3) และคาน F3-L3 ที่มีกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 137.67 และ 147.17 kN ตามลำดับคิดเป็นกำลังเพิ่มขึ้นเพียง 4%

ลักษณะการวิบัติ

ตัวอย่างคานควบคุม C2 และ C3 มีลักษณะการวิบัติแบบ Concrete crushing หลังจาก Steel yielding ดังแสดงใน (Figure 6) คานตัวอย่าง F2-L3, F2-L6, F3-L3 ที่มีลักษณะการวิบัติแบบ Concrete crushing หลังจาก Steel yielding ทั้งสิ้น มีเพียงตัวอย่างคาน F2-L9 ที่มีลักษณะการวิบัติแบบ FRP rupture ก่อน Steel yielding

Figure 6 Failure behavior of specimen C2 and C3.

Figure 7 Failure behavior of specimen F2-L6.

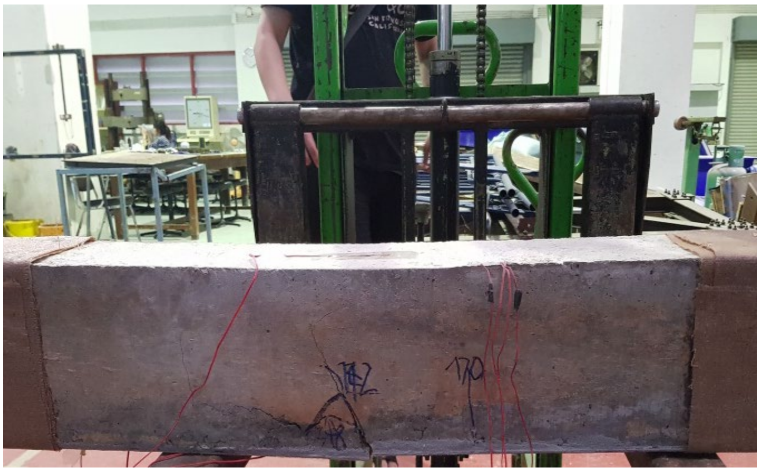


Figure 8 Failure behavior of specimen F2-L9.

การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดจากการทดสอบและการคำนวณ

กำลังรับแรงดัดของคานที่เสริมกำลังด้วย FRP ตามมาตรฐาน ACI 440.2R-17 (2017) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$M_n = A_s f_y\left(d-\frac{\mathcal{B}_1 c}{2}\right)+\Psi_f A_f f_{fe}\left(d_f-\frac{\mathcal{B}_1 c}{2}\right) \quad (1)$$

โดยที่

β_1 คือคอนกรีต Stress Block Factor

A_s และ f_y คือพื้นที่หน้าตัดและความเค้นของเหล็กเสริม

d คือระยะความลึกประสิทธิผลของเหล็กเสริม

c คือความลึกจากผิวบนของผิวคานจนถึงแกนสะเทิน

Ψ_f คือค่าสัมประสิทธิ์ลดกำลังที่ได้จากของ FRP

A_f และ f_{fe} คือพื้นที่หน้าตัดและค่าความเค้นของแผ่น FRP

d_f คือระยะความลึกประสิทธิผลของแผ่น FRP

ค่ากำลังรับแรงดัดที่คำนวณจากสมการ (1) จะขึ้นอยู่กับลักษณะการวิบัติของคานในกรณีที่ลักษณะการวิบัติเป็นแบบ FRP rupture หลังจาก steel yielding ความเครียดของคอนกรีตที่ผิวแรงอัดนอกสุด (ε_c) ที่สภาวะประลัยต้องน้อยกว่าความเครียดประลัยของคอนกรีต (ε_{cu}) ในขณะความเครียดใน FRP เท่ากับ ε_{fu} ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึงต้องมากกว่าความเครียดจุดครากของเหล็กเสริม ในทางตรงข้ามหากเป็นการวิบัติโดย Concrete crushing หลังจาก Steel yielding ค่าความเครียดใน FRP น้อยกว่า ε_{fu}

Table 3 Results from flexural test.

Specimen NO.	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	Failure mode	$P_{u,cal}$ (kN)	$P_{u,cal}/P_u$
C2	86.91	4.14	96.84	14.43	I	70.5	0.74
C3	131.11	6.28	137.62	11.04	I	101	0.9
F2-L3	92.78	4.18	112.15	10.62	I	105.3	0.93
F2-L6	100	5.83	110.95	11.54	I	116	1.03
F2-L9	96.11	6.88	122.28	5.91	II	N/A	N/A
F3-L3	134.72	6.15	143.17	10.04	I	124	0.86

(I = concrete crushing after steel yielding, II = FRP rupture before steel yielding)

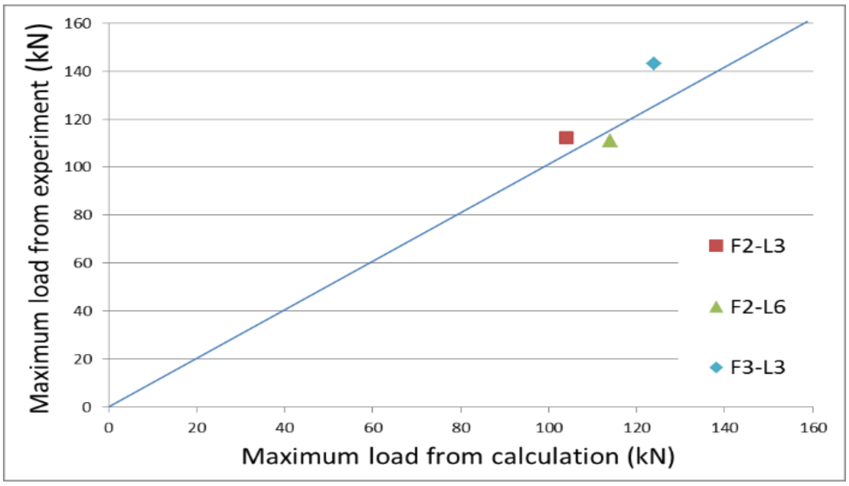


Figure 9 Comparison of load capacity from calculation and experiment.

(Table 3) แสดงกำลังรับแรงดัดที่ได้จากการคำนวณและลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง ภาพที่ 9 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดสอบจากตัวอย่าง F2-L3, F2-L6 และ F3-L3 พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 6.1%, 4.5% และ 13.3% ตามลำดับ ลักษณะการพิบัติจากการคำนวณเมื่อเทียบกับการทดสอบใน

ทุกตัวอย่างมีลักษณะการพิบัติแบบเดียวกันคือ Concrete crushing หลังจาก Steel yielding มีเพียงตัวอย่าง F2-L9 ที่มีลักษณะการพิบัติจากการคำนวณคือ Concrete crushing หลังจาก Steel yielding แต่ลักษณะการพิบัติที่ได้จากการทดสอบคือ FRP rupture เกิดก่อน Steel yielding และค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งหมายความว่าโดยรวมแล้วสมการสำหรับออกแบบที่แนะนำโดย ACI 440.2R มีความปลอดภัย

สรุป

แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอ(JFRP) ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการสุญญากาศสามารถนำมาเสริมกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้โดยวิธีการติดแผ่น JFRP บริเวณผิวล่างของคาน จากตัวอย่างคานที่มีการติดตั้งแผ่น JFRP จำนวน 3,6 และ 9 ชั้น พบว่ามีกำลังรับแรงดัดภายใต้สภาวะประลัยที่มากขึ้นและสามารถลดการโก่งตัวให้กับคานตัวอย่างได้ในระดับหนึ่ง

ผลของการคำนวณอ้างอิงตามมาตรฐาน ACI440.2R เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน 4.5-13.3% โดยผลการทดลองมีค่ามากกว่าการคำนวณแต่เมื่อมีปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการเสริมกำลังที่มากขึ้นความแม่นยำจากการคำนวณมีผลลดลง ดังแสดงในคานตัวอย่าง F2-L9 จะพบว่าปริมาณชั้นของ FRP ส่งผลให้มีกำลังประลัยเพิ่มขึ้นจริงแต่มีลักษณะการวิบัติต่างออกไปจากที่ต้องการโดยมีลักษณะการวิบัติแบบ FRP rupture เกิดก่อน steel yielding

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย (รหัสโครงการ ว-ท (ด) 10.59) และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

พฤติพงศ์ พันธมนัสโสภา. 2557. **ความคงทนและสมบัติของเส้นใยปอกระเจาที่ปรับปรุงผิวผสมในวัสดุยางคอมโพสิต.** วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

N.A.K. Hafizah, M.A.R. Bhutta, M.Y. Jamaludin, M.H. Warid, M. Ismail, M.S. Rahman and I. Yunus. 2014. Kenaf fiber reinforced polymer composites for strengthening RC beams. **Journal of Advanced Concrete Technology** 12 : 167-177.

L. Huang., B. Yan., L. Yan., Q. Xu, H. Tan. and B. Kasal. 2016. Reinforced concrete beams strengthened with externally bonded natural flax FRP plates. **Composites Part B** 91 : 569-579.

Yan, L., B. Kasal. and ,L. Huang. 2016. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. **Composites Part B: Engineering.** 92 : 94-132

American Concrete Institute. 2017. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures** 23-31.

ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนของเหล็กเสริม กับปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างสะพานของกรุงเทพมหานคร

Relationship Between Reinforcement Corrosion And Chloride Content Of Bridge Structures In Bangkok Area

อรวีร์ บุญประคอง[1*] และ วันชัย ยอดสุดใจ[1]

Orrawee Boonprakhong[1*] and Wanchai Yodsudjai[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต กับแนวโน้มการเป็นสนิมของเหล็กเสริม ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสะพานข้ามคลองในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยเก็บผงคอนกรีตมาวัดปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะความลึกต่างๆ ด้วยการไตเตรท (Titration) และทำการวัดแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half Cell Potential) ผลการวิจัยสรุปได้ว่า การตรวจวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในบริเวณที่มีปริมาณของคลอไรด์ในคอนกรีตเพิ่มขึ้น จะมีค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ลดลงในบริเวณนั้น แนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและระดับน้ำลงต่ำสุดมีค่าแนวโน้มการเกิดสนิมมากกว่าบริเวณที่อยู่เหนือผิวน้ำที่อยู่ในบรรยากาศ แต่ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตรวจวัดได้มีค่าไม่เกินร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากโครงสร้างอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลมาก ทั้งนี้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีปัจจัยอื่นร่วมด้วยเช่น การเกิดจากคาร์บอเนชั่น

ABSTRACT

The objective of this research is to establish the relationship between chloride content in concrete and reinforcement corrosion of bridge structures in Bangkok area. The chloride content in concrete was evaluated by titration and the corrosion of reinforcement was evaluated by half-cell potential measurement. As a results the half-cell potential decreased with the increase of chloride content. The corrosion reinforcement steel in Tidal Zone is more severe than the Atmospheric Zone. However, the chloride content in concrete was lower than 0.3% by weight of cement. This was due to the bridge structures is far from the seaside. It was anticipate the corrosion reinforcement was caused from other factors, such as carbonation.

Key words: Chloride, Corrosion, Half Cell Potential, Reinforced concrete structure

*Corresponding author: e-mail address: Orrawee.b@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหนึ่งในสาเหตุที่พบบ่อย การกัดกร่อนของเหล็กเสริมเป็นปัญหาสำคัญต่อความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลรวมไปถึงโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่น้ำกร่อย เนื่องจากผิวคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเล หรืออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นตลอดเวลา การกระจายตัวของคลอไรด์นั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างจากชายฝั่งทะเล การกระจายตัวของคลอไรด์มีปริมาณลดลงเมื่อมีระยะห่างจากชายฝั่งทะเลเพิ่มขึ้น การแทรกซึมของปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงเมื่อระดับความลึกจากผิวหน้าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น รอยแตกร้าวภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การกัดเซาะของกระแสลมและฝนที่บริเวณผิวหน้าคอนกรีต เป็นต้น ที่จะส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตนั้นมีค่าที่เปลี่ยนไป (ศุภชัย และคณะ, 2559) การแทรกซึมของคลอไรด์โซนที่อยู่เหนือผิวน้ำที่สัมผัสกับคลื่นและละอองทะเลมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือโซนที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและระดับน้ำลงต่ำสุด และโซนที่อยู่เหนือผิวน้ำในบรรยากาศทะเล (เกรียงศักดิ์, 2554) ปัจจัยด้านปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์โดยในการทดสอบการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ อัตราการกัดกร่อนโดยใช้กฎของฟาราเดย์ และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตให้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกัน ในการทดสอบน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต พบว่าในตัวอย่างคอนกรีตที่มีปริมาณความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์ที่สูงกว่า การสูญเสียน้ำหนักในเหล็กเสริมจะมากกว่าในตัวอย่างที่มีปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำกว่า (สลิลา, 2558) การหาความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และปริมาณคลอไรด์ ค่าแนวโน้มของปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้นตามค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ลดลง (ทวีศักดิ์, 2554)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เนื่องจากอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ ที่มีต่อแนวโน้มการเสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ได้รับผลกระทบจากคอไรด์ โดยใช้สะพานข้ามคลองบางน้อย เขตทวีวัฒนา และสะพานข้ามคลองนายสร้อย เขตบางแค จังหวัดกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีระยะห่างจากชายฝั่งทะเลอยู่ในช่วง 25-30 กิโลเมตร เป็นกรณีศึกษา โดยทำการวัดปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะความลึกต่างๆ และทำการวัดแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

อุปกรณ์และวิธีการ

ทำการวัดแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยเครื่องมือวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างครึ่งเซลล์ของโลหะมาตรฐานและครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริม (Half Cell Potential) และทำการวัดปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตด้วยเครื่องมือหาปริมาณของคลอไรด์ที่แทรกซึมในคอนกรีตโดยวิธีการไตเตรท (Titration)

วิธีการทดสอบ

การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential) เป็นการตรวจวัดสนิมของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM C876-91 (Reapproved 1999) โดยการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริม ซึ่งถ้าเหล็กเสริมเริ่มเป็นสนิมศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมจะลดลง ในการศึกษานี้ทำการติดสายไฟฟ้าเข้ากับเหล็กเสริมคอนกรีตเพื่อสัมผัสกับขั้วด้านหนึ่งของอุปกรณ์ ขณะที่อีกขั้วหนึ่งของอุปกรณ์ซึ่งเป็นแท่งแก้วภายในบรรจุแท่งทองแดง (Cu) และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) ซึ่งจะนำไปสัมผัสผิวของคอนกรีตโดยมีวัสดุที่เปียกน้ำเป็นสื่อไฟฟ้าโดยนำไปสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการทดสอบจากนั้นอ่านค่าศักย์ไฟฟ้า และนำมาแปรผลโดยเทียบกับค่า

มาตรฐาน เพื่อดูความเป็นไปได้ในการเป็นสนิมของเหล็กเสริม (Figure 1) ในการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ สำหรับตอม่อแต่ละต้นจะกำหนดตำแหน่งที่ทดสอบเป็นตารางห่างกันประมาณ 15 ซม.

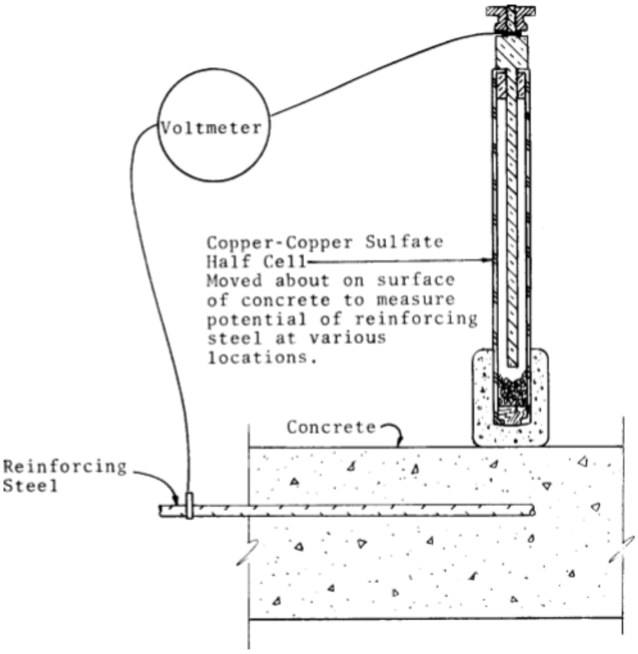


Figure 1 Copper-copper sulfate half cell circuitry.

การทดสอบปริมาณคลอไรด์ ในการทดสอบปริมาณคลอไรด์จะใช้วิธีการไตเตรท (Titration) โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C1152/C1152M-03 โดยจะทำการเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 0–1 ซม., 1–2 ซม., 2–3 ซม., 3-4 ซม.และ 4-5 ซม. ตามลำดับ โดยแต่ละระดับความลึกเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตประมาณ 3 กรัม นำผงคอนกรีตที่เจาะได้ในแต่ละระดับความลึก ไปไตเตรทอ่านค่าด้วยเครื่องมือคลอไรด์มิเตอร์ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องจะเป็นเปอร์เซนต์คลอไรด์ ที่แทรกซึมในคอนกรีต (Figure 2)

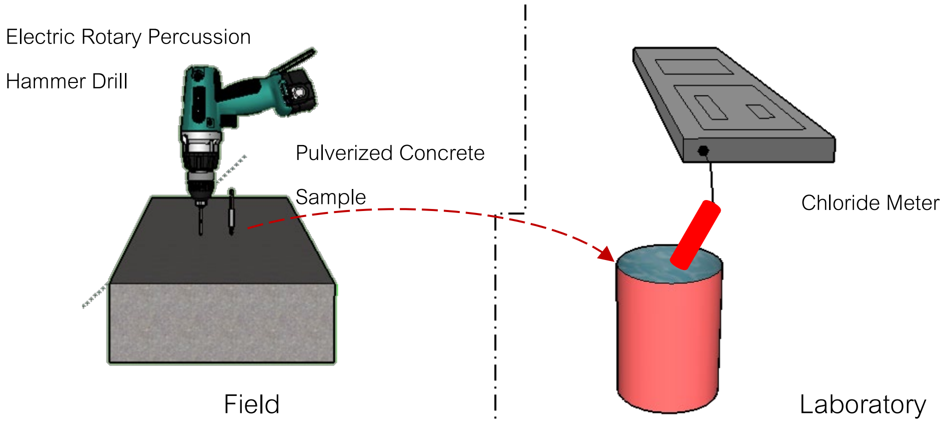
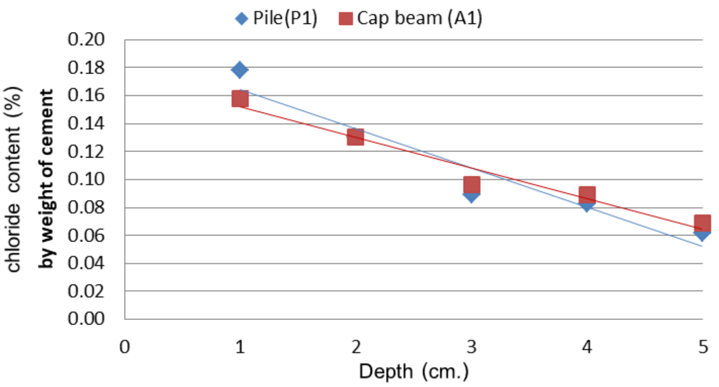


Figure 2 Sampling of concrete powder for chloride content testing.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวัดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้าง

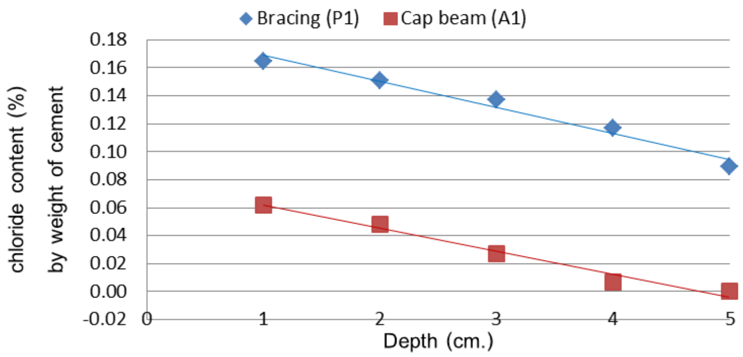
ผลการตรวจสอบปริมาณคลอไรด์ของโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วน ของสะพานข้ามคลองนายสร้อย ตามระดับความลึกที่ได้ทำการเก็บผงคอนกรีตไปทดสอบ พบว่ามีปริมาณคลอไรด์ในส่วนของโครงสร้างเสาเข็ม(กลางน้ำ) และคานรัดหัวเสา(ริมตลิ่ง) ที่ระดับความลึก 1 ซม. แทรกซึมไปยังที่ระดับความลึก 5 ซม. มีค่าที่ใกล้เคียงกัน (Figure 3) เนื่องจากคอนกรีตบริเวณทั้งสองมีรอยร้าว และเกิดการหลุดร่อน ทำให้เกิดการแพร่ของคลอไรด์แทรกซึมเข้าในเนื้อคอนกรีต และตอม่อริมตลิ่งสัมผัสกับดินที่ชุ่มน้ำซึ่งมีการแพร่ของคลอไรด์จากดินที่ชุ่มน้ำสู่คอนกรีต



(%) Cl by weight of cement = (%) Cl by weight of concrete x $\gamma_{concrete}$ / cement content

Figure 3 Chloride content of concrete at Nai Soi bridg.

ผลการตรวจสอบปริมาณคลอไรด์ของโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วน ของสะพานข้ามคลองบางน้อย ตามระดับความลึกที่ได้ทำการเก็บผงคอนกรีตไปทดสอบ พบว่ามีปริมาณคลอไรด์ในส่วนของโครงสร้างคานค้ำยัน(กลางน้ำ) ที่ระดับความลึก 1 ซม. แทรกซึมไปยังที่ระดับความลึก 5 ซม. และคานรัดหัวเสา(ริมตลิ่ง) ที่ระดับความ 1 ซม. แทรกซึมไปยังที่ระดับความลึก 4 ซม. ที่ระดับความลึก 5 ซม. ตรวจไม่พบปริมาณคลอไรด์ (Figure 4) คอนกรีตบริเวณทั้งสองอยู่ในสภาพที่ไม่มีการแตกร้าว คอนกรีตบริเวณกลางน้ำเกิดการแพร่ของคลอไรด์มากกว่าบริเวณริมตลิ่ง และตอม่อริมตลิ่งตรวจพบการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์น้อยกว่าตอม่อกลางน้ำ เนื่องจากอยู่ห่างจากคลองไม่สัมผัสกับน้ำ และดินไม่มีความชุ่มน้ำ



(%) Cl by weight of cement = (%) Cl by weight of concrete x $\gamma_{concrete}$ / cement content

Figure 4 Chloride content of concrete at Bang Noi bridge.

ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตของสะพานข้ามคลองนายสร้อย และสะพานข้ามคลองบางน้อย ที่ตรวจวัดได้มีค่าไม่เกินร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากโครงสร้างอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลมาก

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในโครงสร้าง

ผลการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วน ของสะพานข้ามคลองนายสร้อย ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้ของเสาเข็ม(กลางน้ำ) มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ -370 mV. ค่าที่อ่านได้น้อยกว่า -350 mV ดังนั้นความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่เกิดสนิม และคานรัดหัวเสา(ริมตลิ่ง) มีค่าน้อยที่สุด -268 mV.ค่าที่อ่านได้อยู่ในช่วง -200 ถึง -350 mV ดังนั้นอาจมีการเกิดสนิม (Figure 5, Figure 6) โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C876-09

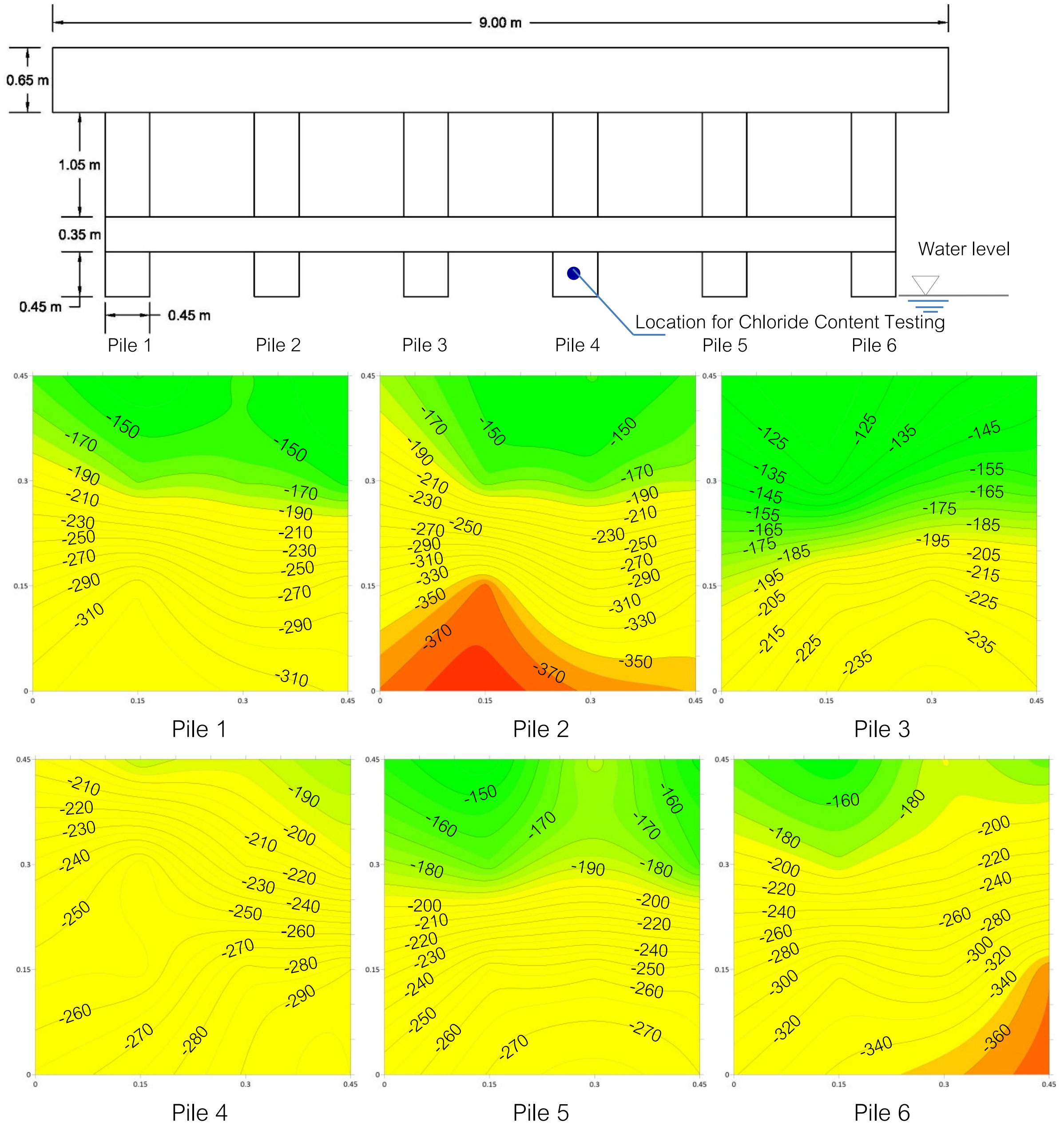


Figure 5 Half cell potential of pile at Nai Soi bridge.

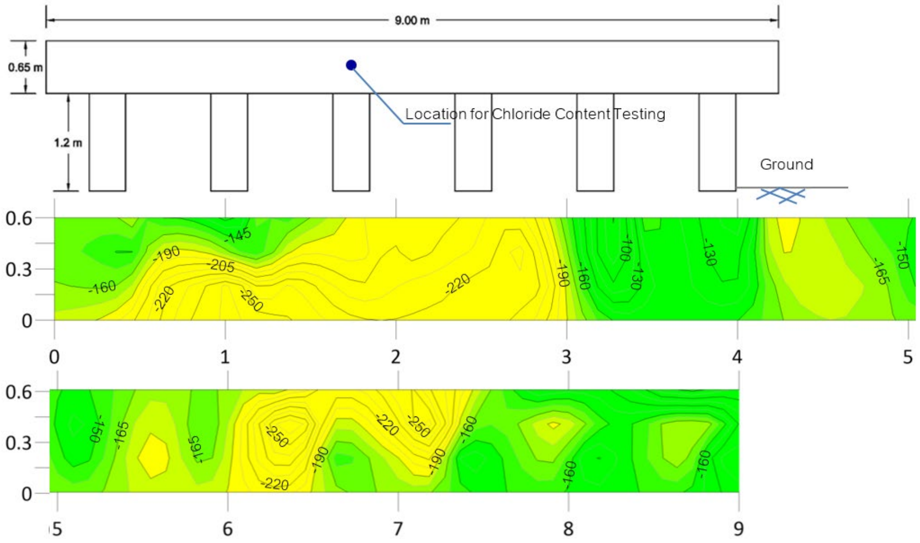


Figure 6 Half cell potential of cap beam at Nai Soi bridge.

ผลการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วน ของสะพานข้ามคลองบางน้อย ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่วัดได้ของคานค้ำยัน(กลางน้ำ) มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ -226 mV. ค่าที่อ่านได้อยู่ในช่วง -200 ถึง -350 mV ดังนั้นอาจมีการเกิดสนิม และคานรัดหัวเสา(ริมตลิ่ง) มีค่าน้อยที่สุด -186 mV.ค่าที่อ่านได้มากกว่า -200 mV ดังนั้นความเป็นไปได้ร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดสนิม (Figure 7, Figure 8) โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C876-09

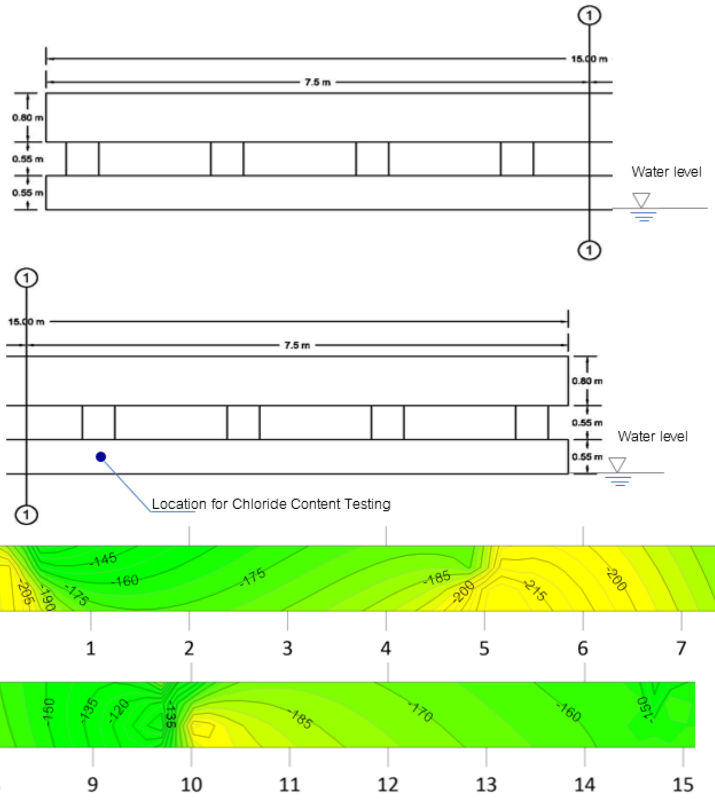


Figure 7 Half cell potential of bracing at Bang Noi bridge

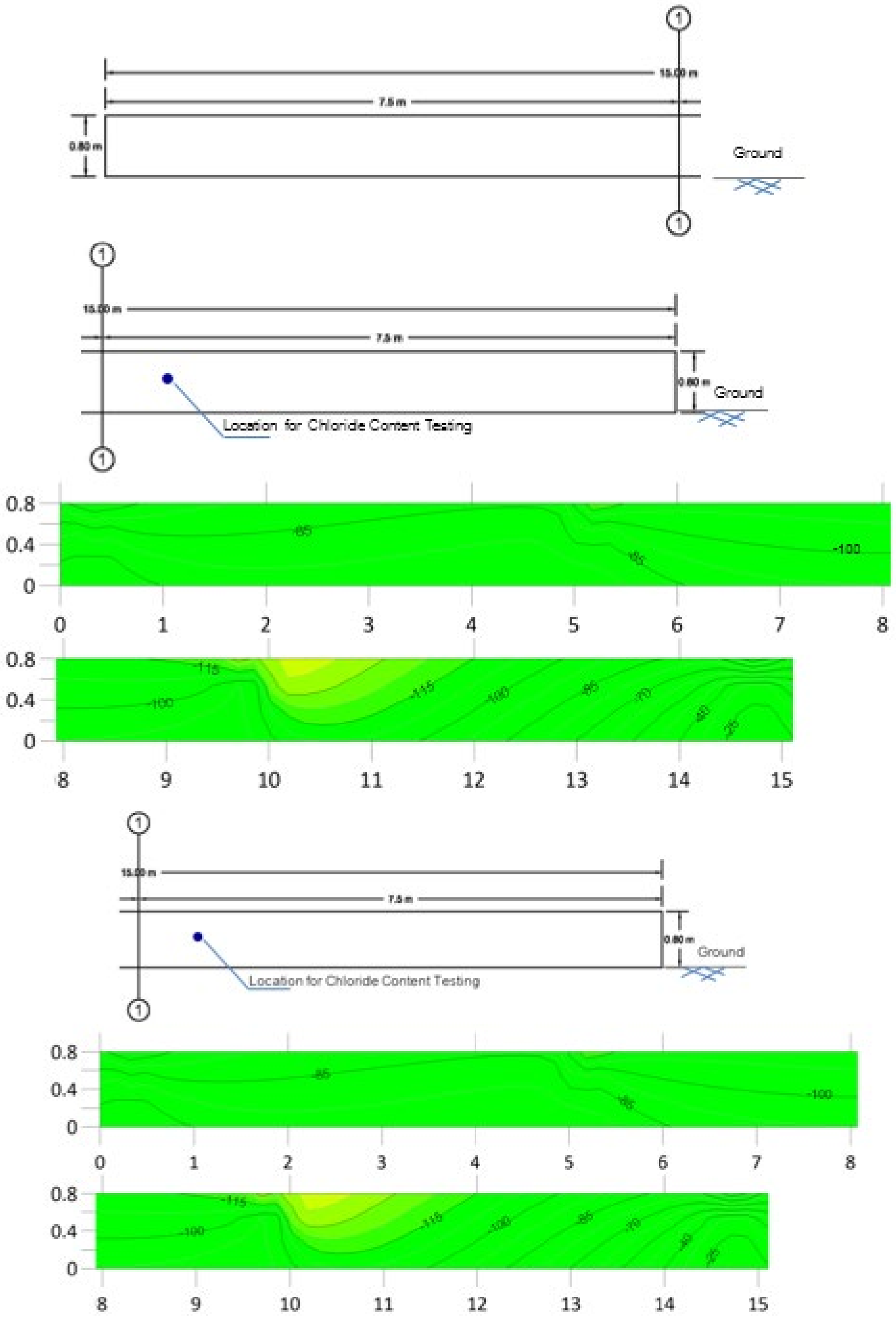


Figure 8 Half cell potential of cap beam at Bang Noi bridge.

เมื่อพิจารณาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์เฉลี่ยที่แต่ละระดับความลึก กับค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตตำแหน่งที่ทำการเจาะคลอไรด์ (Figure 9) ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ลดลงตามแนวโน้มของปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้น ปริมาณคลอไรด์ในช่วงร้อยละ 0.11 - 0.13 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อาจมีการเกิดสนิม

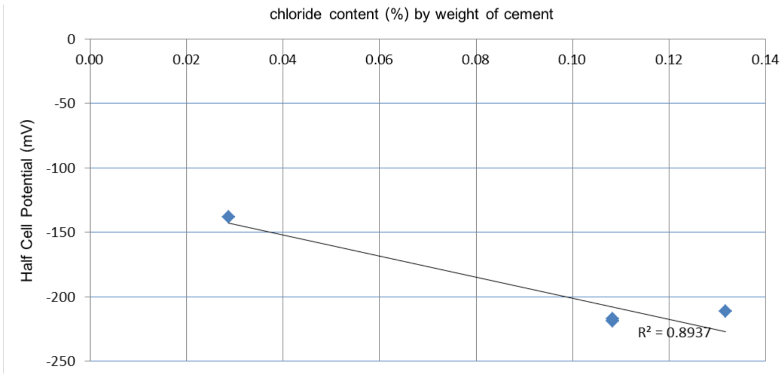


Figure 9 Relationship between half-cell potential and chloride content.

สรุป

1. การตรวจวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในบริเวณที่มีปริมาณของคลอไรด์ในคอนกรีตเพิ่มขึ้น จะมีค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ลดลงในบริเวณนั้น และเหล็กเสริมมีโอกาสเป็นสนิมมากขึ้น

2. ปริมาณคลอไรด์ในช่วงร้อยละ 0.11 - 0.13 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อาจมีการเกิดสนิม

3. ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตจะมีค่ามากที่บริเวณผิวและลดลงเมื่อระดับความลึกเพิ่มขึ้น

4. ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตรวจวัดได้มีค่าไม่เกินร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากโครงสร้างอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลมาก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มงานวิศวกรรมทาง สำนักวิศวกรรมทาง สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร ที่ช่วยให้ข้อมูลสะพานที่ใช้ในการตรวจสอบ และขอขอบคุณกรุงเทพมหานครที่สนับสนุนทุนในการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ บัวนุ่ม. 2554. **ผลของสภาพการสัมผัสน้ำทะเลต่อการเสื่อมสภาพของโครงสร้างท่าเทียบเรือ.** การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทวีศักดิ์ รุจิจรรยาวัฒน์. 2554. **การตรวจสอบและซ่อมแซมโครงสร้างสะพานที่เสื่อมสภาพจากคลอไรด์.** การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภชัย ไทยพุ่ม, ชูศักดิ์ คีรีรัตน์ และทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล. 2559. ปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล กรณีศึกษา: อ.หัวหิน และ อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์. **การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์** 1: 226-233.

สลิลา รักวณิชย์. 2558. **ประสิทธิภาพของการป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยวิธีกัลวานิกคาโทดิก.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

American Society for Testing and Materials. 1991. **ASTM C876-91 (Reapproved 1999) Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.** American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA: ASTM Internationnal.

In-service Subsea Pipeline Anode Life Prediction in Selected Area of Gulf of Thailand (GoT) by Numerical Method.

Suratchata Suankem[1], Wanchai Yodsudjai[1]

ABSRACT

Marine structures in oil and gas industry such as jacket platform structure and subsea pipeline need to be designed to protect from corrosion problem. External coating combined with sacrificial anode (Al-Zn-In) are widely used to serve corrosion protection in subsea pipeline. In this research, remaining life of sacrificial anode under selected subsea pipelines in Gulf of Thailand (GoT) area was predicted using the existing mathematical models. The calculation result of anodes depletion was compared with subsea pipelines inspection results by Remotely Operating Vehicle (ROV) with interpreted by qualify inspectors. As a result, the average accuracy percentage of the calculation was 81.78% in case of the Fusion Bonded Epoxy (FBE) coating with 6% of Coating Break Down factor. For the concrete and asphalt enamel coating with 4% coating break down factor, the average accuracy was 73.53%.

Key word: Pipeline, Anode depletion, Anode retrofit, Coating Break Down

* Corresponding author; email address: Suratchata.s@ku.th

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

One of common problem for structural steel located in corrosive environmental such as offshore area is corrosion problem. Since, subsea pipeline is a key facility in oil and gas industry to transfer oil and gas from production platform to central processing platform and then transfer to shore for further refinery process. So, subsea pipeline was widely applied external coating and sacrificial anode to protect corrosion problem as same as in Gulf of Thailand (GoT). Regarding to in-service condition, codes and recommended practices suggest that anode condition and pipeline Cathodic Potential (CP) shall be monitored and inspected by General Visual Inspection (GVI) with Cathodic Protection reading (CP reading) to ensure the workability of anode that installed with subsea pipeline. For the ageing subsea pipeline, anode retrofit is required, if the anode is unable to contribute it function to protect subsea pipeline from corrosion. However, before anode retrofit project will be set up, the inspection campaign shall be performed to confirm actual condition of anode, but cost of mobilization and demobilization of inspection vessel and inspector crew are quite high. If there are any methods to predict or calculate the remaining life of anode, the cost of vessel and working crew mobilization will be saved. Due to inspection will be performed in a proper time before anode fully depleted. Thus, this study is performed to predict the remaining life of anode by utilizing of existing mathematic models (Bethune and Hartt, 2001) and then the calculation results were compared with inspection results to observe the accuracy of mathematic models.

METHODOLOGY

The existing mathematical model used in this study is shown in equation 1 and it was developed from classical equation called Slope Parameter (Hartt *et al.,* 1998). Also, the accuracy of existing mathematical model was verified by comparing the results with Attenuation equation (Hartt *et al., 2001*).

$$T=\frac{w\times C\times u\times \alpha\times \gamma}{(\varphi_{corr}-\varphi_{c})\times 2\pi\times r_{p}\times L_{as}} \quad (1)$$

Where

T is anode design life (unit is hours), W is weight of consumed individual anode (unit is kg), u is utilization factor. α is polarization resistance (unit is ohm-m^2). γ is the ratio of total to bare pipe surface area or $1/f_c$. φ_{corr} is pipe corrosion potential (unit is mV). φ_c is closed circuit pipe potential (unit is mV). r_p is outer radius of subsea pipeline (unit is m). L_{as} is anode spacing or 2L (unit is m), and C is electrochemical capacity (unit is m Amp-hr / kg). Especially for Coating Break Down factor, If the pipeline coated with single layer of epoxy and located in trawling area, there is a chance that external coating damaged around 4 % of total area (Gro Ostensen Lauvstad *et al.,* n.d.). So, the Coating Break Down factor in this study were applied from 1 - 11%, due to the previous study is only based on epoxy

coating and the location is not located in Gulf of Thailand (GoT) which is more frequencies of trawling activity.

In order to calculate the anode weight depletion, the equation 1 is converted to be equation 2 to make it simple for calculation.

$$W=\frac{T\times(\varphi_{corr}-\varphi_c)\times 2\pi\times r_p\times L_{as}}{C\times u\times\alpha\times\gamma} \quad (2)$$

The statics data of three subsea pipelines are tubulated in table 1, also calculation and study methodology are summarized as a flow chart in figure 1

Table 1 Subsea pipelines statics data.

Pipeline name	Outside Diameter (Inch)	Year installed	Year inspected	Anode weight installed (kg)	External coating type
A	10-3/4”	2008	2012	55	FBE
B	20”	2007	2017	79	Concrete and Enamel asphalt
C	8-5/8”	2007	2017	43	FBE

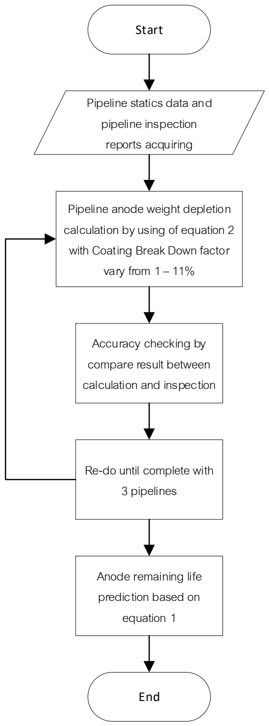


Figure 1 Work flow of anode weight depletion calcuation and accuracy checking.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Calculated anode depletion Vs. Inspected anode depletion

The results demonstrate that pipeline A coated with FBE has the highest accuracy around 95.38% when compare between calculated result and inspected result with the correspondence Coating Break Down factor at 6%. The accuracy percentage generated from figure 2 shown that the calculated result from equation 2 is out of actual range from inspection only 3 points from 65 points of anode along pipeline. Thus, the error of calculation result is around 4.62%. Whereas, the pipeline C which was coated by FBE as well has the highest accuracy at 68.18% or the calculated result is out of range of inspection 7 points from totally 22 points of anode installed along pipeline C with Coating Break Down factor 6% as same as pipeline A. This result shown in figure 3 as per below.

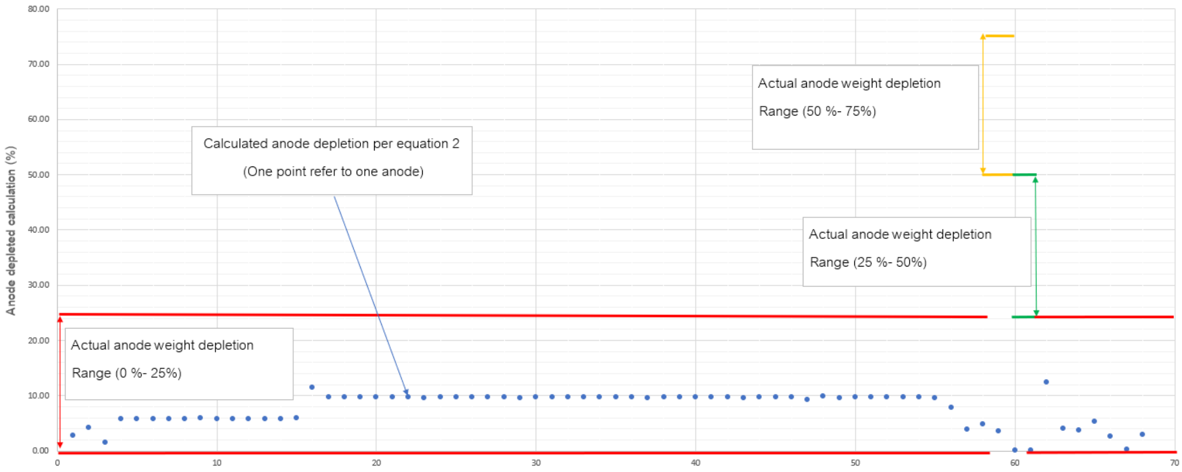


Figure 2 Pipeline A calculated anode depletion Vs. Inspected anode depletion with Coating Break Down factor 6%.

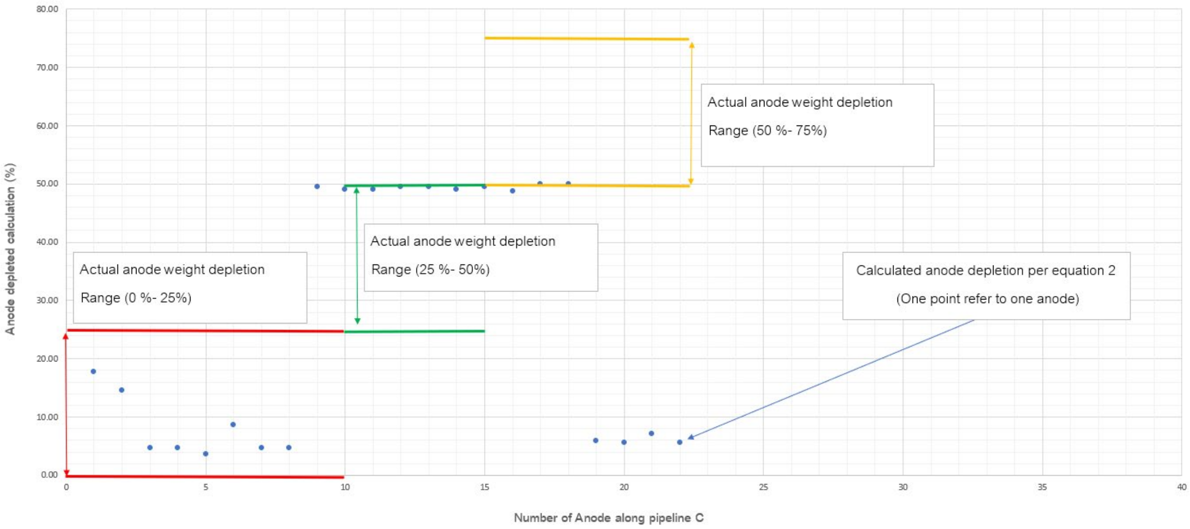


Figure 3 Pipeline C calculated anode depletion Vs. Inspected anode depletion with Coating Break Down factor 6%

For pipeline B coated by concrete with enamel asphalt, the result illustrates that the highest accuracy is 73.53% with correspondence Coating Break Down factor at 4 %. The calculation result is out of range 9 points from 34 points of anode installed along pipeline. Figure 4 shown the calculation result against with inspection result that was reported as a range (25-50% and 50-75%).

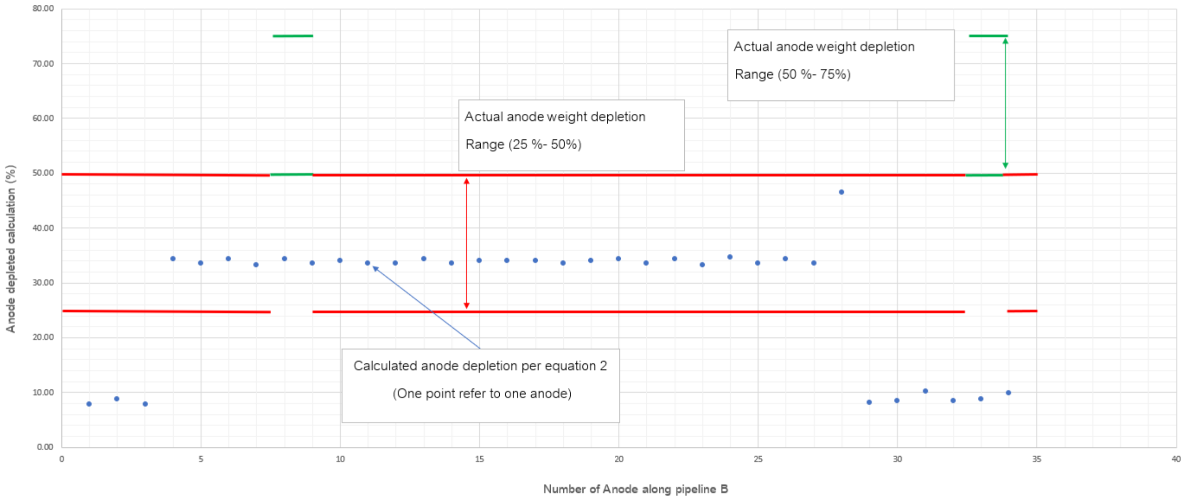


Figure 4 Pipeline B calculated anode depletion Vs. Inspected anode depletion with Coating Break Down factor 4%

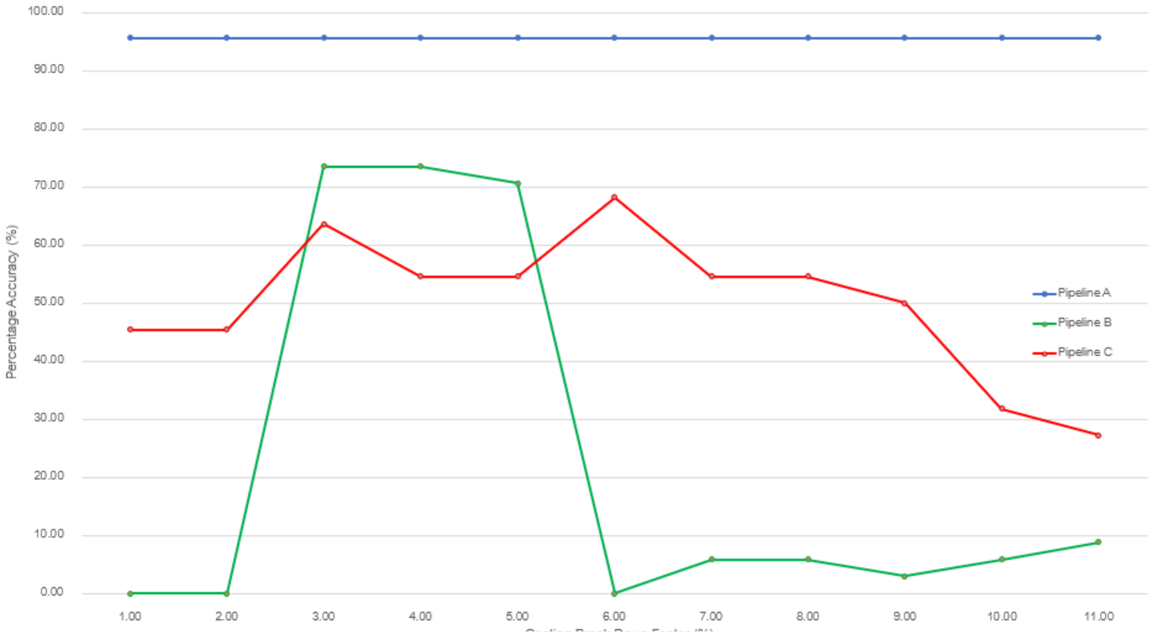


Figure 5 Summary of accuracy percentage of each pipeline with Coating Break Down factor from 1- 11%.

The most appropriate Coating Break Down factor for FBE coating pipeline is 6% which is higher than previous study around 4% and Coating Break Down of 4% is suitable to applied for concrete with enamel coating based on calculation results which is still in range of previous study. Figure 5 shown the highest accuracy percentage of each pipeline with different Coating Break Down factor. The reason that contribute lower number in term of Coating Break Down factor for concrete coating is thickness of

this coating type is generally thicker than FBE. The thickness of concrete coating is around 45 mm, but the FBE coating is basically around 0.3 mm. Also, the cause to lead coating broken down during in-service condition could be trawling activity from ship. So, the thicker external coating should be better than the thinning such as FBE in term of impact of abrasion resistance.

2. Existing mathematical model conservativism checking based on calculated anode depletion Vs. actual inspected anode weight depletion results

Figure 6 to 8 demonstrate the values of anode depletion from calculation based on equation 2 against with actual anode depletion from ROV inspection. The ideal line (diagonal line) represent the most accurate results that can be occurred. For example, if the inspection result shows 12.5% of anode depletion, the calculation result shall be 12.5% to generate point on ideal line. From 3 graphs below can be observed that almost the calculated depletion values are under ideal line. It was implied that calculation results from equation 2 are not in conservative way. Due to there is totally 0% of calculated anode depletion of pipeline A located above the ideal line. Pipeline B consist only 2.94% or only 1 point from 34 points that located above the ideal line. For pipeline C, there is 40.91% or 9 from 22 points calculated anode depletion result of pipeline C located above ideal line. Thus, existing mathematical model is not completely conservative to be used to calculate the remaining life of anode in in-service subsea pipeline.

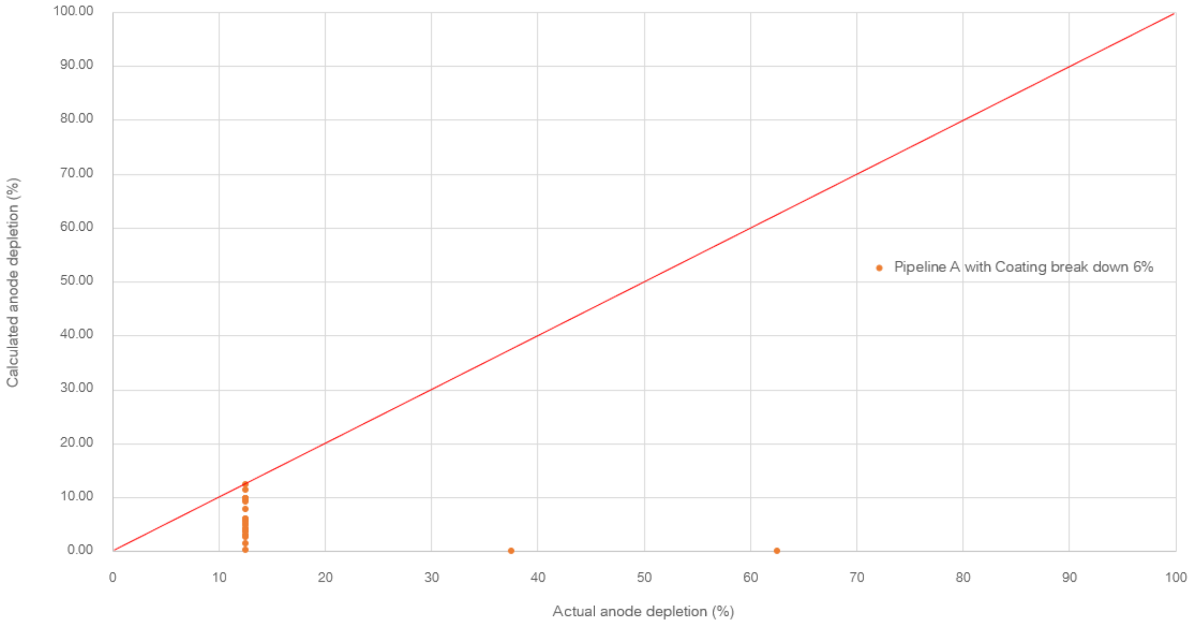


Figure 6 Anode weight depletion from calculation Vs. Anode weight depletion from inspection with ideal line of pipeline A with Coating Break Down factor 6%.

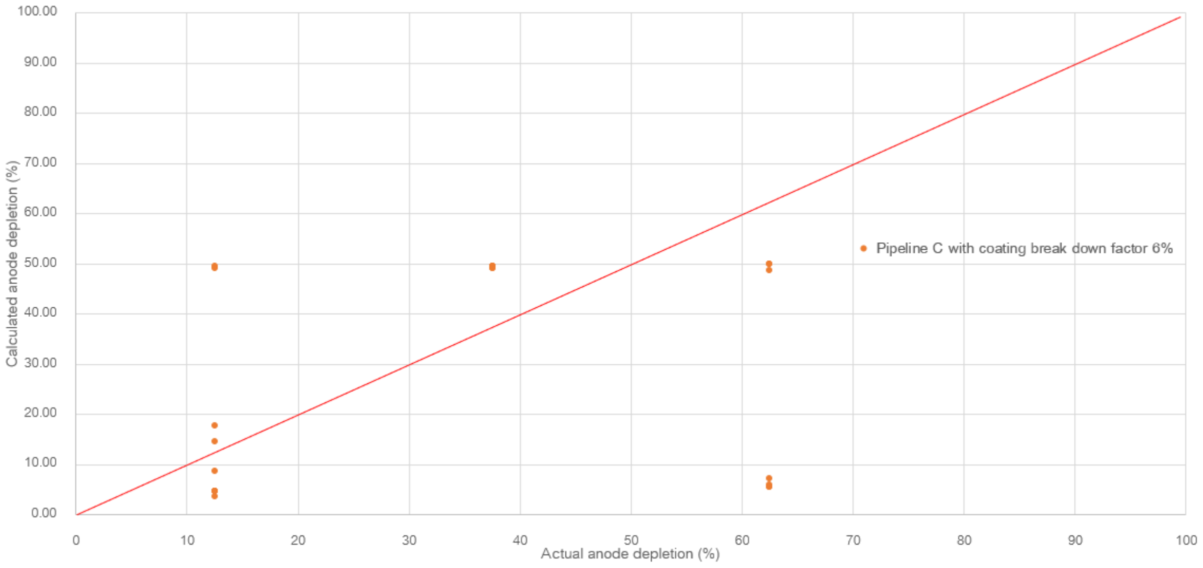


Figure 7 Anode weight depletion from calculation Vs. Anode weight depletion from inspection with ideal line of pipeline C with Coating Break Down factor 6%.

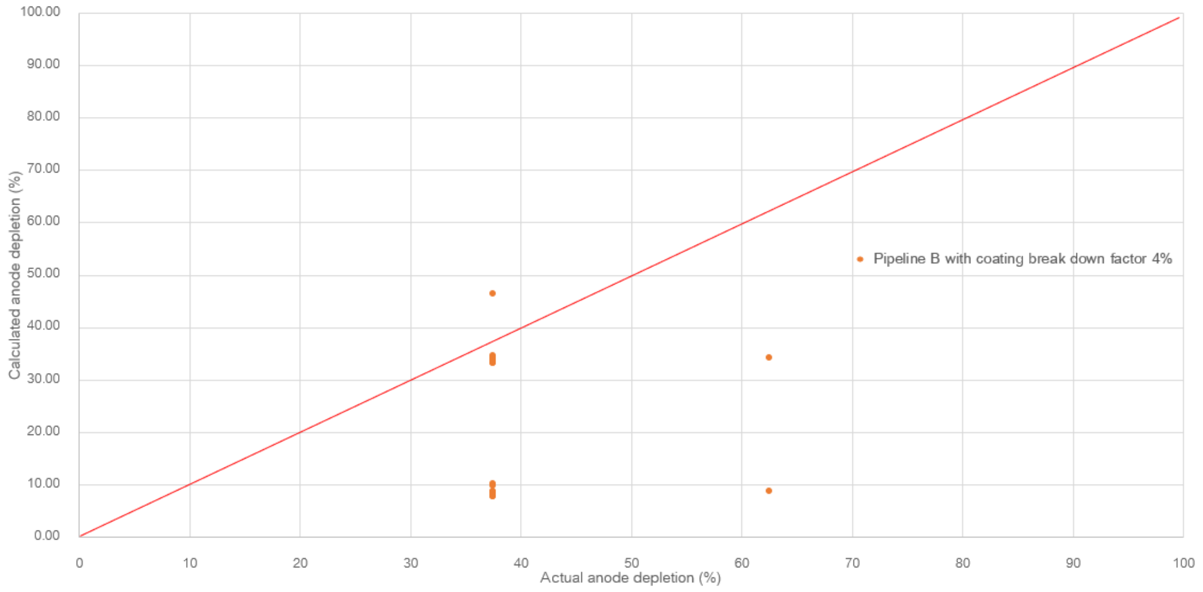


Figure8 Anode weight depletion from calculation Vs. Anode weight depletion from inspection with ideal line of pipeline B with Coating Break Down factor 4%.

3. Anode remaining life prediction

The Anode remaining life was calculated bases on mathematical model and tubulated in table 2. This information will be used for inspection and anode retrofit planning.

Table 2 Calculated remaining life of anode for each pipeline.

Pipeline	Coating Break Down factor	Anode weight at inspectad year (kg)	Expected remaing anode weight (kg)	Remaining life from last inspection
A	6	20.89	9.38	38.3
B	4	52.17	10.43	19.82
C	6	20.89	4.18	9.89

CONCLUSION

1. Accuracy of mathematical model compared with inspection result

The accuracy of pipeline A coated with FBE is 95.38% and pipeline C is 68.18%. So, the average accuracy for pipelines that coated with FBE is 81.78% with 6% of Coating Break Down factor and pipeline that coated with concrete and enamel asphalt get the accuracy around 73.53% with 4% of Coating Break Down factor.

2. Anode remaining life

The remaining life of anode calculated bases on mathematical model which is 38.30, 19.82 and 9.89 years for pipeline A, B and C respectively. These number will be used to plan for detailed and closed visual inspection to ensure condition of anode before anode retrofit project will be performed. However, since the results of mathematical model is not conservative to be used with in-service pipeline condition. Thus, the anode depletion calculation shall be performed more frequently during pipeline operation to monitor depletion rate of anode with inspection campaign carried out to confirm actual condition of anode.

REFERENCES

DNV-GL. 2016. **Recommended Practice Cathodic protection of submarine pipelines.** July 2016.

Lauvstad, G.O., H. Osvoll, J. C. Werenskiold and L. Helgesen. **Field Gradient Survey of Offshore Pipeline Bundles affected by Trawling.**

Hartt, W.H., S. Chen and D.W. Townley. 1998. Sacrificial Anode Cathodic Polarization of Steel in Seawater: Part 2 – Design and Data Analysis. **Corrosion.** 54(4): 317-322.

K. Bethune and W.H. Hartt. 2001. Applicability of the Slope Parameter Method to the Design of Cathodic Protection System for Marine Pipelines. **Corrosion** 57(1): 78-83.

Hartt, W.H., D. Lysogorski, H. Qian, K. Bethune and P. Pierson. 2001. **Retrofit cathodic protection of marine pipeline associated with petroleum production.**

การพัฒนาคุณสมบัติคอนกรีตด้วยวัสดุคริสตัลไลน์และการจ่ายกระแสไฟฟ้า

Development of Concrete Properties by Mixed with Crystalline Materials and Applied with Electricity

วงศธร รังสินธุ์[1] วันชัย ยอดสุดใจ[2] และ ศุภพัชรี รอดเดชา[3]

Wongsatorn Rungsin[1], Wanchai Yodsudjai[2] and Supacharee Roddecha[3]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคอนกรีตด้วยการผสมวัสดุคริสตัลไลน์และกระตุ้นด้วยไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการทดลองด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขณะหล่อคอนกรีต โดยให้แบบเหล็กของก้อนตัวอย่างคอนกรีตเป็นขั้วลบ (Cathode) และ เหล็กเสริมตรงกลางเป็นขั้วบวก (Anode) ทั้งนี้ติดตั้งแผ่นสังกะสี เข้ากับเหล็กเสริมเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วย ทดสอบกับคอนกรีต 4 ประเภทคือ 1. คอนกรีตปกติไม่จ่ายกระแสไฟฟ้า 2. คอนกรีตปกติจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 6 ชั่วโมง 3. คอนกรีตผสมวัสดุคริสตัลไลน์ (Xypex C-1000) ไม่จ่ายกระแสไฟฟ้า และ 4. คอนกรีตผสมวัสดุคริสตัลไลน์ (Xypex C-1000) จ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลการวิจัยสรุปได้ว่าของคอนกรีตที่ถูกจ่ายไฟฟ้ามีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมวัสดุคริสตัลไลน์และถูกจ่ายด้วยไฟฟ้ามีกำลังรับแรงอัดสูงสุด

ABSTRACT

The objective of this research is to develop concrete properties by mixing with crystalline materials and applying with electricity .The experiment was conducted by applying electricity while casting concrete by using the steel mold as a cathode and the reinforcing steel at the middle as an anode. The galvanized sheet was also installed to protect the corrosion of the reinforcement . Four types of concrete was tested: 1. Ordinary Portland Cement (Normal) 2. Ordinary Portland Cement (Charge 6 hr.) 3. Ordinary Portland Cement + Crystalline materials (Normal) and 4. Ordinary Portland Cement + Crystalline materials (Charge 6 hr.). As a result, the concrete applied with the electricity had higher compressive strength than the normal concrete. In addition, concrete mixed with crystalline materials and applied with the electricity had the highest compressive strength.

Key words: Concrete, Crystalline Materials, Electrochemistry

* Corresponding author: e-mail address: **Wongsatorn.ru@ku.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติคอนกรีตโดยเฉพาะกำลังรับแรงอัดคอนกรีตมีมาอย่างต่อเนื่อง เช่น การใช้สารผสมเพิ่ม ผสมกับคอนกรีตเพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาให้คอนกรีตมีรูพรุนและช่องว่างในคอนกรีตลดลง วัสดุคริสตัลไลน์ (Crystalline Materials) ก็เป็นสารผสมเพิ่มที่มีการนำมาใช้ผสมกับคอนกรีตในปัจจุบัน ด้วยความสามารถในการทำปฏิกิริยา crystallization ที่ก่อตัวเป็นผลึกสามารถช่วยเสริมคุณสมบัติในด้านการเพิ่มความทึบน้ำในคอนกรีต การลดการซึมผ่านของคลอไรด์ กันเพิ่มความทนทานต่อสารเคมีที่เป็นกรด และการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (ดุจเทพ, 2553) ซึ่งวัสดุคริสตัลไลน์ (Crystalline Materials) มีสารประกอบหลายอย่าง เช่น $MgO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$ เป็นผลึกเซรามิค (Al-Otoom, 2019) นอกจากส่วนของสารผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มความทนทานคอนกรีต ยังมีการศึกษาการใช้ไฟฟ้าเคมี (Electro-chemical) โดยใช้หลักการของกระแสไฟฟ้า และ การเคลื่อนตัวของอิออน ซึ่งการประยุกต์ใช้วิธีการทางไฟฟ้าเคมีในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเช่นวิธี Electrodeposition ในการป้องกันการเกิดสนิมสำหรับอาคารโครงสร้างคอนกรีตใต้ทะเลที่มีรอยร้าวที่ผิวหน้า โดยจะมีการติด External electrode ไว้ที่ขั้วประจุบวก และ มีเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตไว้ที่ขั้วประจุลบ เมื่อทำการต่อวงจรสมบูรณ์แล้วอิออนของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} จะเคลื่อนที่ไปเกาะบริเวณผิวหน้าคอนกรีตอุดปิดช่องว่างบริเวณรอยร้าวให้มีขนาดเล็กลง (Yodsujai, 2011)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้แนวทางการศึกษาการจ่ายไฟฟ้าในคอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุคริสตัลไลน์ (Crystalline Materials) เพื่อให้อิออนสารประกอบภายในคอนกรีตเกิดการเคลื่อนตัวจากขั้วบวก (Anode) ไปยังขั้วลบ (Cathode) และทำปฏิกิริยา crystallization แล้วนำมาทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบในแต่ละกรณีต่อไป (Fodil, 2018)

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมคอนกรีตสำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้า

1. ออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความทึบแน่น เหมาะสมกับโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล จึงต้องออกแบบคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำๆโดยมีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 0.35 (วิเชียร , 2559) ดังนั้นต้องออกแบบเป็น 2 ส่วนผสมด้วยกัน คือ 1. คอนกรีตธรรมดาที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณสารผสมเพิ่มอยู่ที่ค่า 0.35 และ 2. คอนกรีตธรรมดาที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณสารผสมเพิ่มอยู่ที่ค่า 0.35 เพิ่มสารผสมเพิ่มวัสดุคริสตัลไลน์ (Xypex Admix C-1000) ปริมาณ 3 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร จากการศึกษางานวิจัยแนะนำให้ใช้ 1 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 150 กิโลกรัม เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Crystallization ได้อย่างสมบูรณ์ Al–Otoom (2019) สรุปได้ดังตารางด้านล่างนี้

Table 1 Concrete mix design.

Mixed	Xypex	Cement	Type D	Type F	Rock	Sand	Water
OPC	-	458	1100	2500 - 3000	1060	860	160
OPC - Crystalline	3	458	1100	2500 - 3000	1060	860	160

Xypex = Xypex Admix C-1000　　Type F = Type F Mighty 180

Cement = Cement OPC Type I　　Type D = Type D Sika D1601

Rock = Rock ¾　　OPC = Ordinary Portland Cement

2. การผลิตคอนกรีตกับการทดสอบการยุบตัว

ทำการผลิตคอนกรีต 2 ส่วนผสมในโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จจำนวนอย่างละ 1 ลูกบาศก์เมตร มาหล่อในก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 15x30 เซนติเมตร แล้วนำคอนกรีตแต่ละส่วนผสมมาทดสอบค่าการยุบตัวแต่ละช่วงเวลาห่างกัน 30 นาที จนระยะเวลาครบ 2 ชั่วโมง และ ทำการจดบันทึกผล

Figure 1 Concrete mixed form ready mixed plant.

Figure 2 Slump - loss test.

การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้า

1. การคำนวณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากการสูญเสียอิเล็กตรอนหลังทำปฏิกิริยา

การทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่น รีดักชั่นนั้นเป็นการถ่ายเทอิเล็กตรอนของโลหะขั้ว Anode และ ขั้ว Cathode โดยโลหะที่มีค่า Electrode Potential (E.P.) ต่ำกว่าจะประพฤติตัวเป็นขั้ว Anode ส่วนโลหะที่มีค่า(E.P.) สูงกว่าจะประพฤติตัวเป็นขั้ว Cathode และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ขั้ว Anode ก็จะเกิดการผุกร่อนออกไป ดังเช่นในการวิจัยนี้ขั้ว Anode เป็นเหล็กเสริมซึ่งไม่สามารถที่จะยอมให้เกิดการผุกร่อนได้ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกที่จะใช้แผ่นสังกะสี (Zn) ขนาดเล็กติดกับเหล็กเสริมเพื่อที่จะให้เป็นขั้ว Anode แทนโดยปริมาณ แผ่นสังกะสี (Zn) ที่จะใช้คำนวณได้จาก อัตราการผุกร่อน (Corrosion Rates) จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday laws) ดังสมการด้านล่างนี้

$$W = \frac{ItM}{nF} = \frac{IAtM}{nF}$$

โดยที่ : W = น้ำหนักของโลหะ (g)ที่ผุกร่อนในสารละลาย ณ เวลา t วินาที

I = ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหล (A)

M = มวลอะตอมของโลหะ (g/mol)

n = จำนวณของ e/atom ที่ถูกผลิตที่ใช้ไปในขบวณการผุกร่อน

F = ค่าคงที่ของ Faraday (96,500 C/mol)

I = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (A/cm^2)

A = พื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ย (cm^2)

จากการคำนวณอัตราผุกร่อน (Corrosion Rates) ที่ใช้การติดแผ่นสังกะสี (Zn) ขนาดเล็กติดกับเหล็กเสริมจำนวน 30 กรัม เพื่อให้เกิดการผุกร่อนแทนเหล็กเสริมบริเวณตำแหน่งขั้ว Anode โดยมีกระแสไฟฟ้าขนาด 5 แอมแปร์ไหลผ่านตลอดระยะเวลา 6 ชั่วโมง โดยอ้างอิงจากการที่ได้ออกแบบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (Initial setting time) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สารละลาย MgO SiO_2 ในวัสดุคริสตัลไลน์ (Crystalline materials) สามารถเคลื่อนที่ไปบริเวณต่ำแหน่งของขอบตัวอย่างคอนกรีตได้

2. การเตรียมสายไฟสำหรับใส่ไปในก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก

ก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้คือก้อนทดสอบคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร โดยทำการใช้สายไฟผูกเหล็กเสริมข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร ที่ติดด้วยแผ่นสังกะสี (Zn) เป็นขั้วบวก (Anode) และ มีสายไฟอีก 6 เส้นอยู่โดยรอบบริเวณขอบของก้อนตัวอย่างคอนกรีตเป็นขั้วลบ (Cathode) ดังรูปด้านล่างนี้

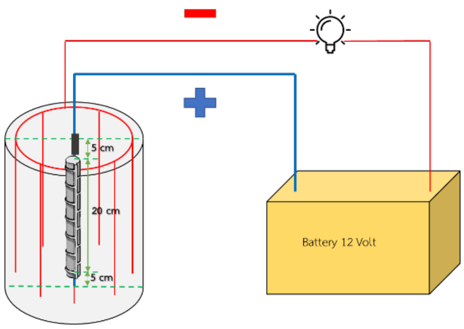


Figure 3 Outline for applying electricity after concrete casting.

Figure 4 Preparation of steel wires at the middle of concrete mold.

การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีต

1. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

โดยปกติของคอนกรีตจะต้องมีการทดสอบกำลังอัดเพื่อตรวจสอบว่าเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ ซึ่งการทำการวิจัยนี้มีการใช้ไฟฟ้าเคมีทำปฏิกิริยา ออกซิเดชั่น รีดักชั่น (Oxidation reduction reaction) จึงต้องการศึกษาว่าก้อนตัวอย่างทดสอบที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน กับก้อนที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้นมีกำลังอัดที่แตกต่างกันหรือไม่ โดยทำการทดลองโดยควบคุมปัจจัยพื้นฐานให้เหมือนกัน แตกต่างกันเพียงการใส่กระแสไฟฟ้าและไม่ใส่กระแสไฟฟ้าเท่านั้น ดังตารางด้านล่างนี้

Table 2 Preparing for testing the compressive strength of concrete.

Test sample type	Number of cylinder		
	7 days	14 days	28 days
OPC 100% (Charge)	2	2	2
OPC 100% (Normal)	2	2	2
OPC 100%+Xypex (Charge)	2	2	2
OPC 100%+Xypex (Normal)	2	2	2

Figure 5 Application of electricity after concrete casting.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทำการทดลองผลิตคอนกรีตทั้งหมด 2 ส่วนผสม คือคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ที่ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ที่ค่า 0.35 และ ส่วนผสมของซีเมนต์ที่ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ที่ค่า 0.35 และ เพิ่มวัสดุคริสตัลไลน์ (Crystalline materials) 3 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ในระหว่างที่ได้ทำการทดสอบนั้นได้เก็บค่าการยุบตัวเปรียบเทียบกันของทั้ง 2 ส่วนผสมในระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้น

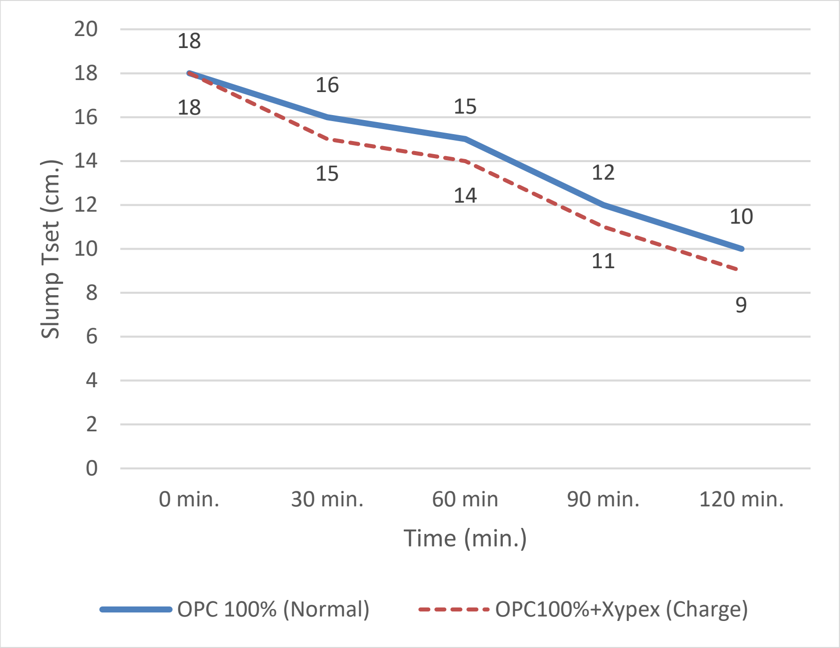


Figure 6 compare slump loss test.

จากการทดสอบค่าการยุบตัวในช่วงระยะเวลาที่มากขึ้นของทั้ง 2 ส่วนผสมคือคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตที่ผสมวัสดุคริสตัลไลน์ Xypex C-1000 พบว่าค่าการยุบตัว คอนกรีตที่ผสมวัสดุคริสตัลไลน์ Xypex C-1000 ลดลงช้ากว่าคอนกรีตปกติเล็กน้อย ตามงานวิจัยที่เคยศึกษาเกี่ยวกับการสูญเสียน้ำของคอนกรีตที่ผสมวัสดุคริสตัลไลน์ Xypex C-1000 ว่าจะรักษาน้ำในส่วนผสมบางส่วนของคอนกรีตได้ยาวนานขึ้นสำหรับการทำปฏิกิริยา Crystallization (Drochytka, 2012) เมื่อเตรียมคอนกรีตเป็นที่เรียบร้อยจึงทำการลำเลียงคอนกรีตเข้าก้อนทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตทรงลูกบาศก์ (Cylinder ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร) แล้วนำคอนกรีตเข้าบ่อบ่มคอนกรีตจนถึงอายุทดสอบ 7 ,14 , 28 วัน ตามผลในภาพกราฟด้านล่าง

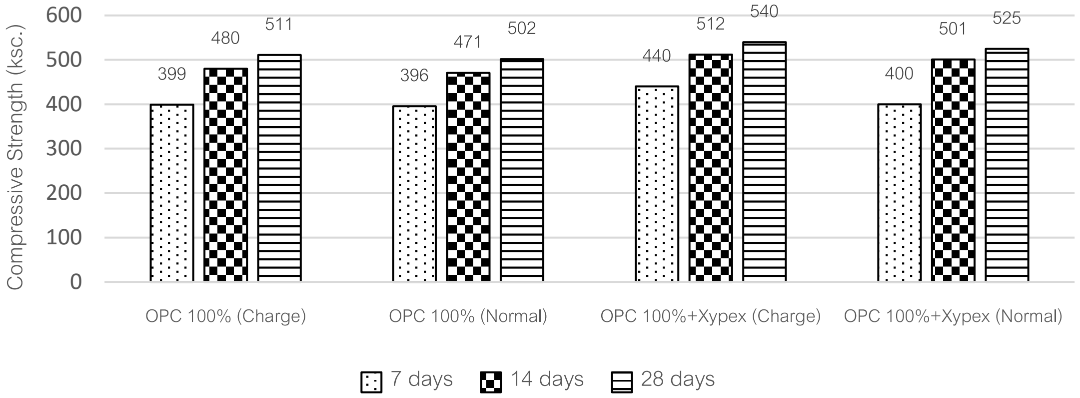


Figure 7 Compressive strength.

จากผลการทดสอบกำลังอัดที่แต่ละช่วงอายุการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีต คอนกรีตที่ผสมวัสดุคริสตัลไลน์ มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา และเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมวัสดุคริสตัลไลน์ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าและไม่จ่ายกระแสไฟฟ้า คอนกรีตที่ผสมวัสดุคริสตัลไลน์ที่จ่ายกระแสไฟฟ้ามีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ไม่จ่ายกระแสไฟฟ้า

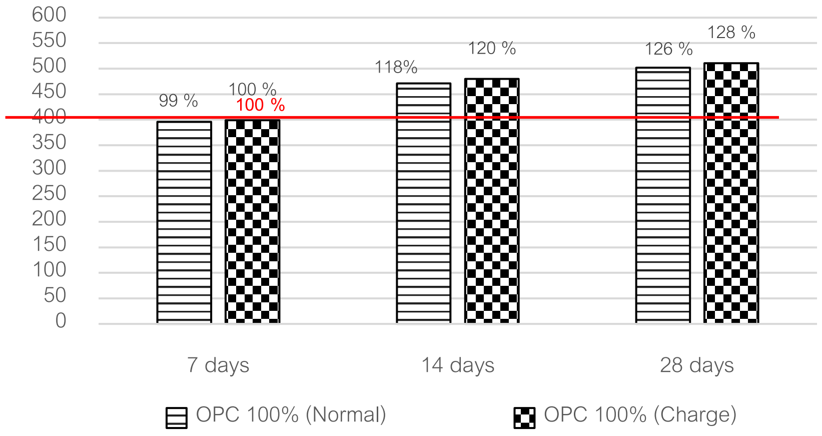


Figure 8 Percentage of increased strength due to normal mixing concrete and normal mixing concrete with electricity application.

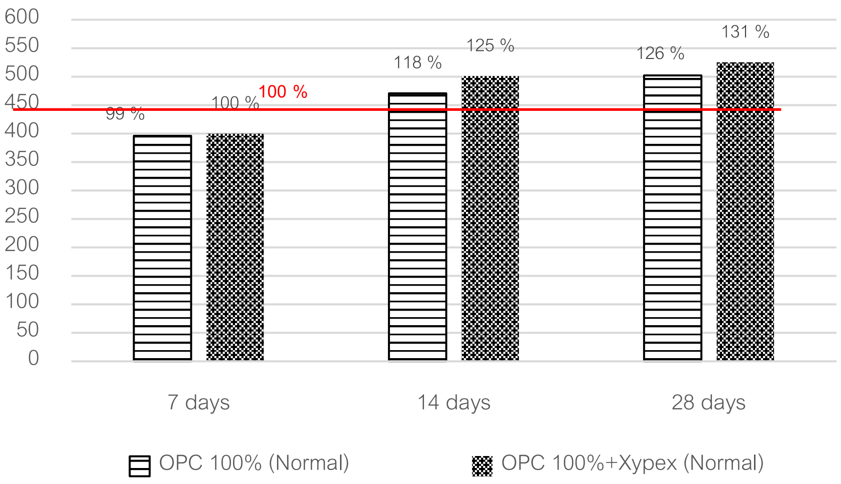


Figure 9 Percentage of increased strength due to normal mixing concrete and mixing crystalline concrete.

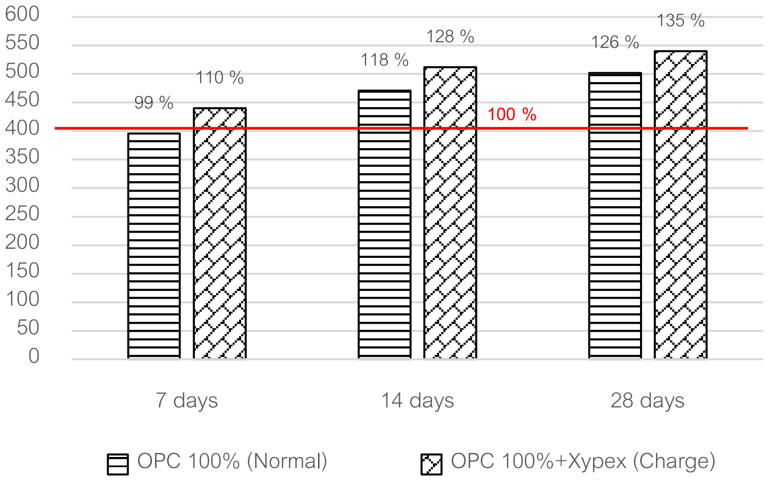


Figure 10 Percentage of increased strength due to normal mixing concrete and mixing crystalline concrete with electricity application.

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต ได้เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดระหว่างคอนกรีตธรรมดาที่เป็นตัวควบคุมกำลังอัดที่ออกแบบ 400 ksc. กับคอนกรีตแต่ละกรณีมีผลทดสอบดังนี้

1. คอนกรีตธรรมดาที่เป็นตัวควบคุมการทดสอบ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 396 ksc. (คิดเป็น 99 % ของกำลังอัดออกแบบ) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 วันเท่ากับ 471 ksc. (คิดเป็น 118% ของกำลังอัดออกแบบ) และ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 471 ksc. (คิดเป็น 126% ของกำลังอัดออกแบบ)

2. คอนกรีตธรรมดาที่ถูกจ่ายกระแสไฟฟ้า กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 399 ksc. (คิดเป็น 100 % ของกำลังอัดออกแบบ) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 วันเท่ากับ 480 ksc. (คิดเป็น 120% ของกำลังอัดออกแบบ) และ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 502 ksc. (คิดเป็น 128% ของกำลังอัดออกแบบ)

3. คอนกรีตผสมวัสดุคริสตัลไลน์ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 400 ksc. (คิดเป็น 100% ของกำลังอัดออกแบบ) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 วันเท่ากับ 501 ksc. (คิดเป็น 125% ของกำลังอัดออกแบบ) และ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 525 ksc. (คิดเป็น 131% ของกำลังอัดออกแบบ)

4. คอนกรีตผสมวัสดุคริสตัลไลน์ที่ถูกจ่ายกระแสไฟฟ้า กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 440 ksc. (คิดเป็น 110% ของกำลังอัดออกแบบ) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 วันเท่ากับ 512 ksc. (คิดเป็น 128% ของกำลังอัดออกแบบ) และ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 540 ksc. (คิดเป็น 135% ของกำลังอัดออกแบบ)

สรุป

1. ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมวัสดุคริสตัลไลน์ (Crystalline materials) สูญเสียน้ำออกไปช้ากว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมวัสดุคริสตัลไลน์

2. คอนกรีตธรรมดาที่ถูกจ่ายด้วยกระแสไฟฟ้ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาทุกช่วงอายุการทดสอบโดยที่ 7 วันสูงกว่า 1% , 14 วันสูงกว่า 2% และ 28 วันสูงกว่า 2%

3. คอนกรีตที่ผสมคริสตัลไลน์ที่ไม่จ่ายกระแสไฟฟ้ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาทุกช่วงอายุการทดสอบโดยที่ 7 วันสูงกว่า 1% , 14 วันสูงกว่า 7% และ 28 วันสูงกว่า 5%

4. คอนกรีตธรรมดาที่ถูกจ่ายด้วยกระแสไฟฟ้ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาทุกช่วงอายุการทดสอบโดยที่ 7 วันสูงกว่า 11% , 14 วันสูงกว่า 10% และ 28 วันสูงกว่า 9%

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัทผลิตภัณฑ์ และ วัตถุก่อสร้าง กับ บริษัท Xypex thailand ที่อนุญาตให้ใช้พื้นที่และ วัตถุดิบทดลองในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ดุจเทพ ยอดมาลัย. 2553. การใช้ Crystalline materials ในการปรับปรุงความคงทนของคอนกรีต. **วารสารคอนกรีต**.

A.Drochytka. 2012. **Microstructural Analysis of Crystalline Technology by Nanosem – Fei nova 200.** 18TH International conference on composite materials . TU Brno,Faculty of Civil Engineering , Brno,Czech Republic.

Al-Otoom, A. 2019. **Crystallization Technology for Reducing Water Permeability into Concrete**. University of Science and Technology, Jordan.

Fodil, D. 2018**. Compressive Strength and Corrosion Evaluation of Concretes Containing Pozzolana and Perlite Immersed in Aggressive Environments.** Department of Civil Engineering, Laboratory of Materials, ENPO, 31000 Oran, Algeria.

Yodsujai. W. 2011. Experimental study on application of electrodeposition method for decreasing carbonation and chloride penetration of cracked reinforced concrete. **Journal of Civil Engineering (Building and Housing)** 12(2), 197-204.

ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน เทียบกับสภาพนำไฟฟ้าในคอนกรีต ด้วยวิธีการเร่งสนิมแบบต่าง ๆ

Relationships between Half-cell Potential and Corrosion Current Density with Electrical Conductivity of Concrete Prepared by Various Corrosion Accelerating Methods

พงษ์พัฒน์ อิ่มน้อย [1] และ วันชัย ยอดสุดใจ[1]

Phongpat Imnoi[1] and Wanchai Yodsudjai

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Half-cell Potential (HCP), Corrosion Current, เทียบกับสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่ได้จากการวัดด้วยวิธี 4-Pin Wenner arrays โดยเลือกใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่ต่างกัน 6 ประเภท ตัวอย่างทั้งหมดมีคุณสมบัติที่เหมือนกันคือ มีกำลังอัดประลัย 260 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (water cement ratio) 0.58 ในขั้นตอนการบ่ม ตัวอย่างทั้ง 6 ประเภท จะถูกแยกออกเป็น 2 กลุ่ม ตามประเภทวิธีการเร่งสนิม ซึ่งตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ใช้วิธีเปียกสลับแห้งเฉพาะด้านเดียวของผิวคอนกรีต (wet/dry) ตามมาตรฐาน ASTM G109-99a ส่วนตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ใช้วิธีการส่งไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเหล็ก (impressed voltage corrosion) หลังจากนั้นตัวอย่างทั้งหมดจะถูกทำการตรวจวัดเพื่อประเมินการเกิดสนิมด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้ (1) การตรวจวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (HCP), (2) การวัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) และ (3) การตรวจวัด conductivity ในคอนกรีตด้วยวิธี 4-Pin Wenner arrays) ผลการศึกษาพบว่า (1) Conductivity กับ HCP มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบผกผัน โดยมีค่า R-squared สำหรับตัวอย่างที่ถูกเร่งสนิมด้วยวิธี wet/dry และ วิธี impressed voltage อยู่ที่ 0.81 และ 0.43 ตามลำดับ (2) Conductivity กับ i_{corr} มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผัน โดยมีค่า R-squared สำหรับตัวอย่างที่ถูกเร่งสนิมด้วยวิธี wet/dry และ วิธี impressed voltage อยู่ที่ 0.67 และ 0.34 ตามลำดับ (3) การเร่งสนิมด้วยวิธี wet/dry มีแนวโน้มจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของ Conductivity ในเนื้อคอนกรีตมากการเร่งสนิมด้วยวิธี impressed voltage

ABSTRACT

This article depicts relationships between half-cell potential (HCP), and corrosion current density (i_{corr}) with electrical conductivity measured with 4-pin Wenner arrays obtained from six various types of concrete with the same water cement ratios of 0.58. To simulate corrosion of the steel rebar, the specimens were separated to two groups: (1) for the former group, corrosion was accelerated with the wet/dry method in accordance with ASTM G109-99a and (2) for the latter, corrosion was accelerated with the impressed voltage corrosion method which apply direct electrical current into the steel rebars. Corrosion assessment methods, including HCP, corrosion current density, and 4-pin resistivity methods, were conducted on the specimens. The result can be summarized that (1) conductivity has inverse linear relationship with HCP with R-square of 0.81 and 0.43 for the wet/dry group and for the impressed voltage group, respectively, (2) conductivity has direct linear relationship with i_{corr} with R-square of 0.67 and 0.34 for the wet/dry group and for the impressed voltage group, respectively, and (3) The specimens from the wet/dry method tend to have higher conductivity than the specimens from the corrosion current method.

Key worrds: Corrosion, Reinforced Concrete, Electrical Resistivity, Half-cell Potential

Corresponding author; e-mail address: phongpatim@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุโครงสร้างที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคอนกรีตเสริมเหล็กมีความคงทนแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักได้สูง และยังมีอายุการใช้งานที่นาน ปัญหาที่เกิดในคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานานมักพบการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Corrosion) การกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะเกิดแรงดันภายในส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้ม อีกทั้งเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นส่วนสำคัญในการรับแรงดึง และโมเมนต์ดัด หากเหล็กเสริมในคอนกรีตเสื่อมสภาพจะส่งผลให้เกิดความเสียหายและความปลอดภัยของโครงสร้างเป็นอย่างมาก

การประเมินความเสี่ยงในการเกิดกัดกร่อนของเหล็กเสริม วิธีที่ใช้กันคือการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell Potential, HCP) ตามมาตรฐาน ASTM C876-09 ซึ่งได้กำหนดความเสี่ยงในการเกิดการกัดกร่อน ไว้ตามค่า HCP ต่างๆ โดยค่า HCP ที่น้อยแสดงถึงความเสี่ยงในการเกิดการกัดกร่อนที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามการวัด HCP นั้น มีข้อจำกัด คือ (1) จำเป็นต้องมีจุดให้ Probe ข้างหนึ่งของ Multimeter สัมผัสกับเหล็กเสริมที่จะทำการวัด HCP ซึ่งหากต้องทำการประเมินความเสี่ยงในการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่แล้ว อาจต้องทำการเจาะคอนกรีตหลายจุด (2) การวัด HCP ไม่สามารถบอกถึงความเข้มข้นและระยะที่คลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ (3) การวัด HCP นั้น ผิวคอนกรีตจำเป็นต้องมีความชื้นดังนั้นจึงควรวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ของคอนกรีตด้วยเพื่อประกอบการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการประเมินแนวโน้มการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell Potential, HCP) ตามมาตรฐาน ASTM C876-09 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density, i_{corr}) มาเปรียบเทียบกับค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่**ได้จากการวัดด้วยวิธี** 4-Pin Wenner arrays เพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์ของการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีต

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็ก

เหล็กเสริมคอนกรีตนั้นมีความต่างศักย์ในลักษณะของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ทำให้เกิดขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งจะมีชั้นของฟิล์มออกไซด์ที่เกิดจากปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ (Passivation Film) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อิเล็กโทรไลต์ไปสัมผัสกับผิวเหล็กเสริมได้ แต่เมื่อชั้นของฟิล์มออกไซด์ถูกทำลายลงก็จะไม่มีสิ่งใดที่ป้องกันไม่ให้อิเล็กทรอไลต์ไปสัมผัสกับผิวเหล็กเสริมได้ โดยคลอไรด์ไอออน (Cl^-) นั้นเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังนั้นคลอไรด์ในปริมาณต่ำมากๆ ก็เพียงพอต่อการเกิดการกัดกร่อนโครงสร้างเสริมเหล็กได้ (วันชัย ยอดสุดใจ และพิชิตนันท์ วันรักษ์, 2562) จากการเก็บรวบรวมสถิติของ Vassie (Vassie, 1984) การเกิดสนิมในโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์ระหว่างโอกาสพบการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 1

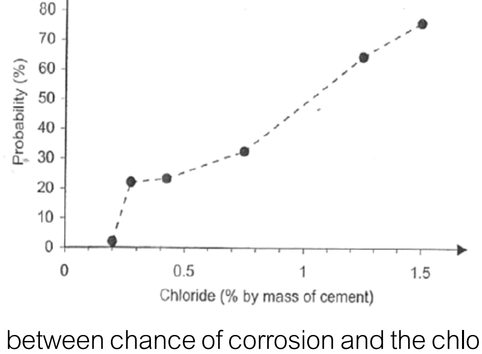


Figure 1 Shown the relationship between chance of corrosion and the chloride content in concrete (Vassie, 1984).

การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell Potential, HCP)

การประเมินความเสี่ยงในการเกิด Corrosion นั้น วิธีที่นำมาใช้กัน คือ การจำลอง galvanic cell โดยให้เหล็กเสริมและสารละลายที่อยู่บริเวณรอบๆ การจำลองให้เหล็กเสริมและคอนกรีตเป็นส่วนหนึ่ง galvanic cell และวัดค่า galvanic potential ของเหล็กเสริมในสารละลายใดๆ ที่อยู่รอบๆ เทียบกับค่า galvanic potential ของแท่งทองแดงที่จุ่มอยู่ในสารละลาย copper sulphate โดยมี porous stone ทำหน้าที่เป็น salt bridge ซึ่งค่าที่วัดได้นี้เรียกว่า Half-cell Potential (HCP) ตามมาตรฐาน ASTM C876-09 (ASTM International, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 2 (Figure 2) การอ่านค่าจะอ่านในลักษณะของการประเมินการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ดังแสดงในตารางที่ 1 (Table 1)

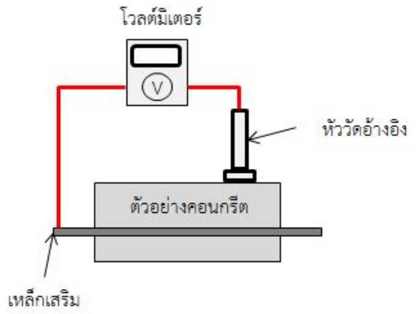


Figure 2 Shown measurement the half-cell potential.

Table 1 Half-call potential reading and percent chance of active corrosion.

Half-cell Potential reading (mV vs. CSE)	Percentage chance of active Corrosion
< -250	10%
-250 to -350	50%
> -350	90%

ที่มา : ASTM C876-09 (ASTM International, 2009)

การวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) **ที่ได้จากการวัดด้วยวิธี** 4-Pin Wenner arrays

โดย AASHTO Designation: T 358-15 (ASSHTO, 2015) ได้แนะนำวิธีการวัด resistivity ในคอนกรีตด้วย 4-pin Wenner array เพื่อเป็นการประเมินความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนในก้อนคอนกรีตตัวอย่าง ซึ่งค่า resistivity จะเป็นค่าที่แปรผกผันกับค่า Conductivity โดยค่าที่ได้จากวิธีนี้มีความสอดคล้องกับผลของการทดสอบที่แนะนำ ตามมาตรฐาน ASTM C1202-12 (ASTM International, 2012) และ ASTM C1556-11a (ASTM International, 2011) ซึ่งจะทำให้สามารถประเมินปริมาณการเกิดการกัดกร่อนที่มีอยู่ในคอนกรีตได้

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุผสมและการเตรียมตัวอย่างในการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาต่อจากผลงานวิจัยเรื่องการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตในคอนกรีตประเภทต่างๆ (Neville, 1995) โดยเลือกใช้คอนกรีตปอร์ตแลนด์กำลังอัดสูง, คอนกรีตปอร์ตแลนด์ทนต่อซัลเฟต, คอนกรีตผสมเถ้าลอย, คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม, จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตผสมเส้นใยแก้ว โดยมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนผสมมวลหยาบที่ใช้ในการศึกษามีขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 9

มิลลิเมตร มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.68 และส่วนผสมมวลละเอียดที่ใช้ในการศึกษาเลือกใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.45

ตัวอย่างเหล็กเสริมข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD40 (กำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 40.0 เซนติเมตร บริเวณปลายเหล็กเสริมทั้งสองด้านทำการเคลือบอีพ็อคซีและพันด้วยเทปพันสายไฟ ข้างละ 5.0 เซนติเมตร ให้เหลือส่วนที่ไม่ถูกเคลือบความยาว 18.0 เซนติเมตร

สัดส่วนผสม

คอนกรีตตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาจะใช้คอนกรีตกำลังอัดประลัย 260 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วันอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.58 ดังแสดงในตารางที่ 3 (Table 3)ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 11.5x28.0x15.0 เซนติเมตร

Table 2 Chemical and physical properties of composite materials.

Chemical Properties	Cement Type 1	Cement Type 3	Cement Type 5	Fly Ash	Silica Fume	GGBF Slag
CaO	62.80	64.89	62.86	11.18	0.20	36.05
SiO_2	20.60	20.73	20.97	43.88	92.00	34.06
Al_2O_3	4.13	4.49	3.49	24.31	0.70	16.27
Fe_2O_3	2.99	3.32	4.34	12.51	1.20	1.70
SO_3	62.80	2.76	2.12	0.78	-	2.16
MgO	2.99	1.25	3.33	2.75	0.20	7.38
L.O.I.	2.53	1.23	1.21	0.17	-	1.44
B.F.	452.7	477	376	346	22,500	460
S.G.	3.15	3.22	3.13	2.08	2.20	2.96

CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, SO_3, MgO (%)

L.O.I. = Loss on ignition (%)

B.F. = Blaine fineness (m^2/kg)

S.G. = Specific gravity

Table 3 The proportion of concrete samples

Symbol	Cement (kg.)	Pozzolan (kg.)	Coarse aggregates (kg.)	Fine aggregates (kg.)	Water (m^3)
HPC	284	-	1135	815	163
SPC	284	-	1135	815	163
PFC	227	57	1135	815	163
PBSC	213	71	1135	815	163
GPRC[1]	31	124	1135	815	-
PGRC[2]	284	-	1135	815	163

HCP = คอนกรีตปอร์ตแลนด์กำลังอัดสูง

SPC = คอนกรีตปอร์ตแลนด์ทนต่อซัลเฟต

PFC = คอนกรีตผสมเถ้าลอย 20%

PBSC = คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม 10%

GPRC = จีโอโพลีเมอร์คอนกรีต

PGRC = คอนกรีตผสมเส้นใยแก้ว (AR-G) 1%

[1] ผสม Na_2SiO_3 = 31 kg, NaOH = 31 kg.

[2] ผสม Admixtures = 2.84 kg.

การทดสอบการกัดกร่อนเหล็กเสริมภายในคอนกรีตด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาและการประเมินการกัดกร่อนเหล็กเสริมภายในคอนกรีต

โดยการใช้แบบหล่อคอนกรีตทรงสี่เหลี่ยมขนาด 11.5x28.0x15.0 เซนติเมตร ตัวอย่างจะถูกบ่มในห้องควบคุมความชื้นที่อุณหภูมิปกติ เป็นเวลา 100 วัน และทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 3 วัน เสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ที่ทำการเคลือบด้วยอีพ็อคซีและพันเทปพันสายไฟให้เรียบร้อย และให้มีระยะหุ้มเหล็กเสริม 2.5 เซนติเมตร ทำการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าที่ปลายเหล็กเสริมข้ออ้อยทั้งสามเส้นกับตัวต้านทาน 100 โอห์มและทำการติดตั้งอุปกรณ์ทรงสี่เหลี่ยมไว้ด้านบนขนาด 7.5x7.5x10.0 เซนติเมตร เป็นอ่างขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้ทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยา 2 วิธี (1) วิธีการเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (wet-dry) ตามมาตรฐาน ASTM G109-99a (ASTM International, 1999) โดยให้ตัวอย่างเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้ง (Immersing - drying cycles test) ดังแสดงในรูปที่ 3 เป็นเวลา 245 วัน อัตราส่วนเปียกต่อแห้งเท่ากับ 5 วัน : 2 วัน และทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนทุก 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4 (Figure 4) และ (2) วิธีการเร่งปฏิกิริยาด้วยการส่งไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเหล็ก (Impressed voltage) โดยจะใช้แผ่นสแตนเลสเป็นอิเล็กโทรดโดยต่อปลายสายกับเหล็กเสริมด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 5 เป็นเวลา 49 วัน และทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนทุก 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 6 (Figure 6) โดยจะศึกษาผลทดสอบการเกิดการกัดกร่อนด้วยวิธีการเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (wet-dry) เปรียบเทียบวิธีการเร่งปฏิกิริยาด้วยการส่งไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเหล็ก (Impressed voltage) ของก้อนคอนกรีตตัวอย่างประเภทต่างๆ

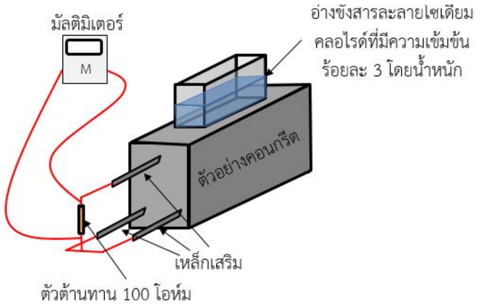


Figure 3 Shown corrosion test with the wet/dry method in accordance with ASTMG109-99a.

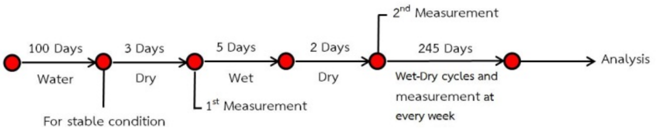


Figure 4 Shown the sequence of test intervals and measurements of corrosion with the wet/dry method in accordance with ASTMG109-99a.

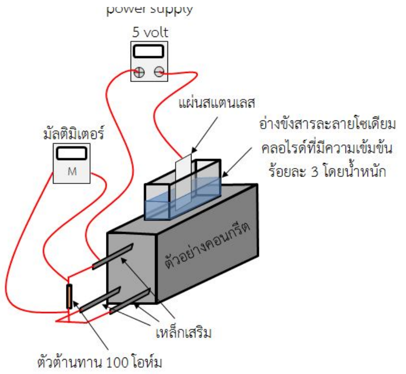


Figure 5 Shown corrosion test with impressed voltage corrosion method.

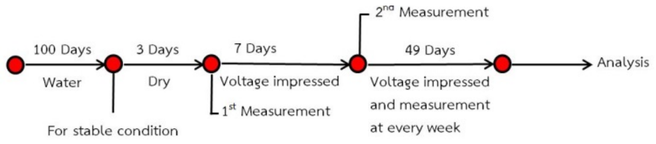


Figure 6 Shown the sequence of test intervals and measurements of corrosion with impressed voltage corrosion method.

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell Potential, HCP)

หลังจากระยะเวลาวัฏจักรเปียกผ่านไป 24 ชั่วโมง เข้าสู่วัฏจักรแห้ง ให้เริ่มทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ด้านข้างของตัวอย่างคอนกรีต โดยต่อปลายสายกับเหล็กเสริมด้านบนและใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับ $Cu/CuSO_4$ วัดที่ผิวด้านข้าง จำนวน 3 จุด โดยวัดจากระยะกึ่งกลางและระยะออกจากระยะกึ่งกลาง ข้างละ 7.0 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C876-09 ดังแสดงในรูปที่ 7 (Figure 7)

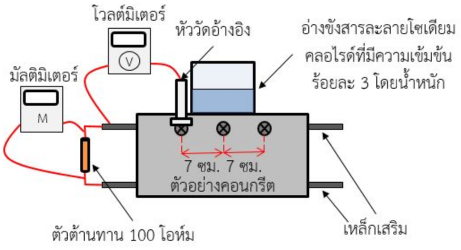


Figure 7 Shown the measurements position of the half-cell potential.

การวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density, i_{corr})

วัดค่าศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทาน 100 โอห์มด้วยมัลติมิเตอร์ที่มีความละเอียดในการวัดถึง 0.01 มิลลิโวลต์ โดยผลที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ จะนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ในหน่วยไมโครแอมป์ต่อตารางเมตร จากสมการ (1) และ (2)

$$V = IR \quad (1)$$

$$Current\ Density = I/A \quad (2)$$

เมื่อ V คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

I คือค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

R คือค่าความต้านทานไฟฟ้า ในที่นี้เท่ากับ 100 โอห์ม

A คือพื้นที่ผิวสัมผัสของเหล็กเสริมที่สัมผัสกับเนื้อของตัวอย่างคอนกรีต ในที่นี้พื้นที่ผิวของส่วนตรงกลางที่ไม่ได้เคลือบอีพ็อคซีเท่ากับ 67.85 ตารางเซนติเมตร

Current Density คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

การวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) **ด้วย** 4-Pin Winner arrays

การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ใช้การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบ 4-Pin Wenner array ตามที่แนะนำใน AASHTO Designation: T 358-15 โดยอิเล็กโทรดคู่กลางจะถูกวางค่อมอยู่ระหว่างเหล็กเสริมบน ดังแสดงในรูปที่ 8 (Figure 8)โดยระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของแต่ละอิเล็กโทรด (a) เท่ากับ 0.02 ม. และกระแสที่ถูกจ่ายเข้าไปในคอนกรีต (I) นั้น จะถูกวัดด้วยสัดส่วนของค่าความต่างศักย์ที่วัดคร่อมระหว่างตัวต้านทาน 6 กิโลโอห์ม และค่าความต่างศักย์ที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดคู่กลาง (V) นั้น จะถูกใช้เพื่อคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ดังสมการสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity, σ)

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

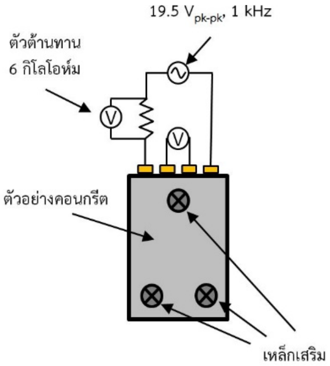


Figure 8 Shown electrode arrangement for electrical conductivity measurements with 4-pin wenner arrays.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

จากรูปที่ 9 (Figure 9) **แสดงค่าเฉลี่ย** HCP **และค่าเฉลี่ยสภาพนำไฟฟ้า เมื่ออายุคอนกรีต** 356 **วัน จากก้อนคอนกรีตตัวอย่าง ประเภท** HPC, SPC, PFC, PBSC, GPRC **และ** PGRC ดังนี้

ด้วยการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาด้วยการส่งไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเหล็ก (Immersing-drying cycles test, Im voltage) ตามมาตรฐาน ASTM G109-99a พบว่า จากการทดลองวัดค่า HCP ของเหล็กเสริมในคอนกรีต มีค่ามากสุดและน้อยสุดเท่ากับ -401 และ -919 mV ตามลำดับและค่า Conductivity ในคอนกรีต มีค่าน้อยสุดและมากสุดเท่ากับ 0.0002 และ 0.0043 S/m ตามลำดับ

4.1.2 ด้วยการทดสอบด้วยวิธีเร่งโดยธรรมชาติเปียกสลับแห้งทั้งก้อนตัวอย่าง (wet-dry cycles, wet/dry) พบว่า จากการทดลองวัดค่า HCP ของเหล็กเสริมในคอนกรีต มีค่ามากสุดและน้อยสุดเท่ากับ -372 และ -793 mV

ตามลำดับและค่า Conductivity ในคอนกรีต มีค่าน้อยสุดและมากสุดเท่ากับ 0.0018 และ 0.0043 S/m ตามลำดับ

จากรูป 10 (Figure 10) **แสดงค่าเฉลี่ย** I_{corr} **และค่าเฉลี่ยสภาพนำไฟฟ้า เมื่ออายุคอนกรีต** 356 **วัน จากก้อนคอนกรีตตัวอย่าง ประเภท** HPC, SPC, PFC, PBSC, GPRC **และ** PGRC ดังนี้

ด้วยการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาด้วยการส่งไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเหล็ก (Immersing-drying cycles test, Im voltage) ตามมาตรฐาน ASTM G109-99a พบว่า จากการทดลองวัดค่า I_{corr} ของเหล็กเสริมในคอนกรีต มีค่าน้อยสุดและมากสุดเท่ากับ 0.2606 และ 0.7439 µA/cm^2 ตามลำดับและค่า Conductivity ในคอนกรีต มีค่าน้อยสุดและมากสุดเท่ากับ 0.0002 และ 0.0043 S/m ตามลำดับ

ด้วยการทดสอบด้วยวิธีเร่งโดยธรรมชาติเปียกสลับแห้งทั้งก้อนตัวอย่าง (wet-dry cycles, wet/dry) พบว่า จากการทดลองวัดค่า I_{corr} ของเหล็กเสริมในคอนกรีต มีค่าน้อยสุดและมากสุดเท่ากับ 0.1383 และ 1.1102 µA/cm^2 ตามลำดับและค่า Conductivity ในคอนกรีต มีค่าน้อยสุดและมากสุดเท่ากับ 0.0018 และ 0.0043 S/m ตามลำดับ

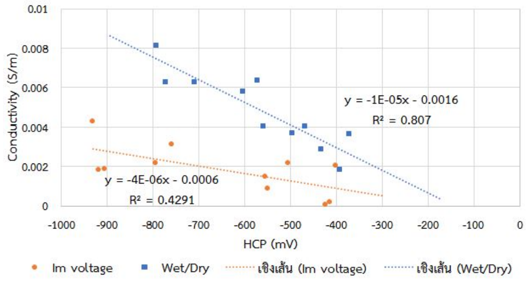


Figure 9 shown average HCP and electrical conductivity.

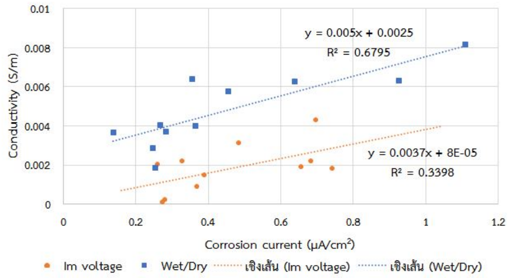


Figure 10 shown average I_{corr} and electrical conductivity.

สรุป

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

(1) ความสัมพันธ์ระหว่าง HCP และ Conductivity มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบผกผัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficent of Determination, R^2) ของตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบด้วยวิธีเร่งโดยธรรมชาติเปียกสลับแห้งทั้งก้อนตัวอย่าง (wet-dry) และวิธีเร่งปฏิกิริยาด้วยการส่งไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเหล็ก (Impressed voltage) อยู่ที่ 0.81 และ 0.43 ตามลำดับ

(2) ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{corr} และ Conductivity มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรพัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficent of Determination, R^2) ของตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบด้วยวิธีเร่ง

โดยธรรมชาติเปียกสลับแห้งทั้งก้อนตัวอย่าง (wet-dry) และวิธีเร่งปฏิกิริยาด้วยการส่งไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเหล็ก (Impressed voltage) อยู่ที่ 0.67 และ 0.34 ตามลำดับ

(3) การทดสอบด้วยวิธีเร่งโดยธรรมชาติเปียกสลับแห้งทั้งก้อนตัวอย่าง (wet-dry) มีแนวโน้มส่งผลการเพิ่มของ Conductivity ในเนื้อคอนกรีตมากกว่าการทดสอบด้วยวิธีเร่งปฏิกิริยาด้วยการส่งไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเหล็ก (Impressed voltage) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมากจากที่ก้อนตัวอย่างกลุ่มที่ถูกบ่มด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

วันชัย ยอดสุดใจ และพิชิตนันท์ วันรักษ์. 2562. การกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตในคอนกรีตประเภทต่างๆ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 12. 2017.

ASSHTO, 2015. **ASSHTO T358-15 Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

ASTM International. 1999. **ASTM G109-99a, Standard Test Method for determining the effects of chemical admixture on the corrosion of embedded steel in concrete exposed chloride environments Annual Book of ASTM Standards**, ASTM International, West Chonshohoken, PA.

ASTM International. 2009. **ASTM C876-09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM International. 2011. **ASTM C1556-11a Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion**, ASTM International, West Chonshohoken, PA.

ASTM International. 2012. **ASTM C1202-12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**, ASTM International, West Chonshohoken, PA.

Neville, A. M. 1995. **Properties of Concrete.** 4^{th} Edition. Pearson Education Limited, Harlow, England.

Vassie, P.R. 1984. “Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges”. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers** 76(8798): 713.

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

Subject: Engineering and Architecture

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

KASETSART UNIVERSITY

การประมาณรังสีดวงอาทิตย์ในระนาบเอียงและมุมเอียงที่เหมาะสมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย

Estimation of Solar Radiation and Optimum Tilt Angles of Solar Collector in Thailand

ศิษฏ์พริษฐ์ พลตื้อ[1*] และ ชาญณรงค์ อัศวเทศานุภาพ[2]

Sidparid Poltue[1*] and Charnnarong Asavatesanupap[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำหนดมุมเอียงแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ให้พลังงานสะสมตลอดทั้งปีสูงสุด และนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพจากการปรับเปลี่ยนมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ 2 รูปแบบ ได้แก่การปรับมุมแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ประจำฤดูกาล และการปรับมุมแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์รายเดือน เปรียบเทียบกับการติดตั้งแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ในแนวระนาบ และหาปริมาณพลังงานที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์และข้อมูลการวัดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวมในแนวระนาบและรังสีกระจายระนาบ 6 ปี ในจังหวัดนครปฐม ละติจูดที่ตั้งที่ 13.62 องศา เพื่อหาปริมาณรังสีตกกระทบในระนาบเอียง จากผลการศึกษาพบว่ามุมแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ 14 องศา ส่งผลให้พลังงานสะสมทั้งปีสูงสุด และคิดเป็นพลังงานสะสมที่เพิ่มขึ้น 2.28% เมื่อเปรียบเทียบกับการติดตั้งในแนวระนาบ จากการเสนอแนวทางการปรับเปลี่ยนมุมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ทั้ง 2 รูปแบบ พบว่าการปรับมุมประจำฤดูกาลสามารถผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นคิดเป็น 6.60% และการปรับมุมประจำเดือนสามารถผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 8.20% เมื่อเปรียบเทียบกับการติดตั้งในแนวระนาบ

ABSTRACT

The purpose of this research seeks to determine optimum tilt angles for solar collectors in Thailand to produce maximum energy. The author used two models to calculate output energy to ascertain the optimal tilt angle for solar collectors: seasonally and monthly compared with the horizontal surface case. Data were gathered between 2012 through 2017 related to the average global and diffuse solar radiation of Nakhon Pathom (latitude 13.62° N) for this study throughout. The results show that the annual optimum tilt angle of Thailand was 14° and the output energy increased by 2.28%. Moreover, the two models of the optimal tilt angle for solar collectors changing seasonally and monthly increased the output energy 6.60% and 8.20%, respectively.

Key words: solar radiation, optimum tilt angle, solar energy, Thailand

* Corresponding author; e-mail address: Sidparid.p@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12121

[1]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat university, Pathum Thani 12121

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12121

[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat university, Pathum Thani 12121

คำนำ

จากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ ปีของประเทศไทย (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) สถานการณ์ดังกล่าวหลายภาคส่วนได้หาแนวทางการใช้พลังงานอย่างยั่งยืน โดยกระทรวงพลังงานได้กำหนดแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกปีพ.ศ.2558 ถึง พ.ศ.2579 (Alternative Energy Development Plan [AEDP], 2015) โดยมีเป้าหมายเพิ่มการใช้พลังงานทดแทนในทุกภาคส่วนของสังคม และลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อเป็นการลดการนำเข้าพลังงานและเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ การใช้พลังงานทดแทน จะมุ่งเน้นการใช้พลังงานทดแทนที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศซึ่งประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำขนาดเล็ก พลังน้ำขนาดใหญ่ พลังงานชีวมวล พลังงานก๊าซชีวภาพ พลังงานขยะ และพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพ (พลังงานจากเอทานอลและไบโอดีเซล) ประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนต่าง ๆ ในปี พ.ศ. 2579 รวมทั้งหมด 19,684.40 เมกะวัตต์ โดยเป้าหมายกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2575 อยู่ที่ 6,000 เมกะวัตต์หรือคิดเป็น 30.48 % จากพลังงานทดแทนทั้งหมด นับเป็นพลังงานทดแทนที่ถูกนำมาใช้มากสุดหากเปรียบเทียบกับพลังงานทางเลือกทั้งหมดที่กล่าวมา (Table 1) จะเห็นได้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์ มีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศไทย

การผลิตพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือการผลิตพลังงานในรูปแบบความร้อนและการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานทั้ง 2 แบบ คือการกำหนดมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ โดยมุมเอียงที่ส่งผลให้การผลิตพลังงานมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดนั้น จะแตกต่างกันไปตามแต่ละติจูดที่ตั้งของพื้นที่ ปัจจุบันมีการศึกษาค้นคว้าการกำหนดมุมเอียงที่เหมาะสมในหลายพื้นที่ เช่น บรูไน (Mohd and Malik, 2001) ซีเรีย (Kamal, 2009) แคนนาดา (Rowlands *et al.*, 2010) ซาอุดิอาระเบีย (Tarek, 2016) ไต้หวัน (Chang, 2010) สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ (Jafarkazemi, Saadabadi and Hadi, 2012) อินเดีย (Jamil *et al.*, 2016) และอียิปต์ (Ibrahim, 2013) เป็นต้น

Table 1 Percentage of alternative energy consumption (Department of alternative energy development and efficiency, 2019).

Alternative Energy	2017 (MW)	2018 (MW)	Target in 2032 (MW)
Solar Energy	2,697.26	2,962.44	6,000.00
Wild Energy	627.82	1,102.82	3,002.00
Small Hydro Power	182.28	187.72	376.00
Biomass	3,157.28	3,372.94	5,570.00
Biogas	475.42	505.24	1,280.00
MSW	191.47	317.82	550.00
Large Hydro Power	2,906.40	2,919.66	2,906.40
Total	10,237.93	11,368.64	19,684.40

งานวิจัยนี้ศึกษามุมเอียงที่เหมาะสมในประเทศไทย โดยใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาณรังสีตกกระทบในระนาบเอียง โดยใช้ข้อมูลปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวม และรังสีกระจายในแนวระนาบซึ่งเก็บรวบรวมในปี พ.ศ.2555 ถึงปี พ.ศ. 2560 โดยห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (Figure 1, 2) ละติจูดที่ตั้งที่ 13.62 องศา คำนวณปริมาณรังสีตกกระทบในระนาบเอียงอื่นๆ ในการจำลองการปรับเปลี่ยนมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ มุมเอียงที่เหมาะสมจะพิจารณาจากมุมที่ส่งผลให้พลังงานสะสมตลอดทั้งปีสูงสุด และนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ 2 รูปแบบ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในรูปแบบพลังงานที่เพิ่มขึ้น

Figure 1 Diffuse solar radiation meter.

Figure 2 Direct solar radiation meter.

Table 2 Nomenclature (Jamil *et al*., 2016).

H_B	Daily beam radiation incident on an inclined surface, (MJ/m2-day).	R_d	Ratio of average daily diffuse radiation incident on an inclined surface to that on a horizontal surface
H_D	Daily sky-diffuse radiation incident on an inclined surface, (MJ/m2-day).	R_b	Ratio of average daily beam radiation incident on an inclined surface to that on a horizontal surface
H_R	Daily ground reflected radiation incident on an inclined Surface, (MJ/m2-day).	n	Days of year
H_T	Daily global radiation on a tilted surface, (MJ/m2-day).	δ	Sunrise hour angle, sunset hour angle
H_b	Daily beam radiation incident on a horizontal surface, (MJ/m2-day).	ω_s	Surface slope from the horizontal
H_d	Daily diffuse radiation incident on a horizontal surface, (MJ/m2-day).	β	Latitude
		θ_z	Zenith angle

$$\delta = 23.4\sin\left(360\times\frac{(284+n)}{365}\right) \quad (1)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}\left(-\tan\varnothing\ \tan\delta\right) \quad (2)$$

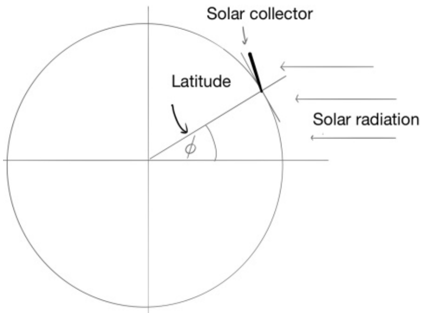
$$H_T = H_B + H_D + H_R \quad (3)$$

$$H_D = H_d\left(\frac{1+\cos(\beta)}{2}\right) \quad (4)$$

$$H_B = (H_g - H_d)R_b \quad (5)$$

$$R_b = \frac{\omega_s\ \sin\delta\sin(\varnothing-\beta)+\cos\delta\sin\omega_s\ \cos(\varnothing-\beta)}{\omega_s\ \sin\varnothing\sin\delta+\cos\varnothing\ \cos\delta\ sin\omega_s} \quad (6)$$

$$H_R = H_g\rho\frac{1-\cos(\beta)}{2} \quad (7)$$



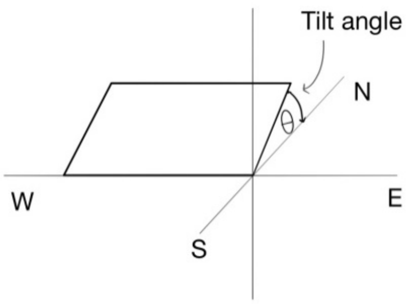


Figure 3 Latitude, Tilt angles of solar collector detail. **Figure 4** Tilt angles of solar collector detail.

วิธีการวิจัย

การคำนวณค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์บนระนาบเอียง

การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ 1 รอบจะใช้เวลา 365.26 วัน หรือเราเรียกกันว่า 1 ปี โดยแกนหมุนของโลกเอียงทำมุม 23.45° กับเส้นแนวรังสีดวงอาทิตย์ เราเรียกแทนมุมระหว่างเส้นศูนย์สูตรกับแนวรังสีดวงอาทิตย์ว่ามุมเดคลิเนชัน มุมดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ เราสามารถคำนวณหามุมเดคลิเนชันในแต่ละช่วงเวลาได้จากสมการที่ 1 (Cooper, 1996) และการหมุนรอบตัวเองของโลกจะส่งผลให้ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านเส้นขอบฟ้าซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่าพระอาทิตย์ขึ้นและพระอาทิตย์ตก จากการกำหนดให้แผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศใต้ในการศึกษานี้ จะส่งผลให้มุมพระอาทิตย์ขึ้น (ω_{sr}) และมุมพระอาทิตย์ตก (ω_{ss}) มีลักษณะสมมาตรกัน ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จะแทนค่ามุมพระอาทิตย์ขึ้น และมุมพระอาทิตย์ตกด้วยตัวแปร (ω_s) (Table 2) โดยคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างมุมเดคลิเนชันกับละติจูดที่ตั้งของพื้นที่ ดังที่แสดงในสมการที่ 2 (Jamil *et al.*, 2016)

จากลักษณะภูมิศาสตร์ของประเทศไทย ตั้งอยู่บนพื้นที่เขตร้อนชื้นเหนือเส้นศูนย์สูตร ตั้งแต่ละติจูด 5 องศา 37 ลิปดาเหนือ ถึง 20 องศา 28 ลิปดาเหนือ ซึ่งจะส่งผลให้ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงสิงหาคมบางพื้นที่ของประเทศไทยนั้น ดวงอาทิตย์จะมีแนวโคจรผ่านเส้นขอบฟ้าไปในทางทิศเหนือ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดช่วงการปรับมุมเอียงตั้งแต่ -20 องศา ไปจนถึง 90 องศา โดยทำมุมกับแนวระนาบ (Figure 3, 4) การคำนวณหาค่าปริมาณรังสีรวมตกกระทบในระนาบเอียง จะสามารถคำนวณหาได้จากผลรวมรังสีแต่ละชนิดดังสมการที่ 3 (Jamil *et al.*, 2016) โดยสามารถแบ่งรังสีดวงอาทิตย์แยกย่อยได้เป็น 3 ชนิด คือรังสีกระจายในระนาบเอียง

สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4 รังสีตรงในระนาบเอียงสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 5 โดยคำนวณจากความสัมพันธ์กับรังสีตรงในแนวระนาบดังที่แสดงสมการที่ 6 (Liu and Jordan, 1990) และรังสีสะท้อนสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 7 (Jamil *et al.*, 2016) โดย คือดัชนีการสะท้อนของโลกในพื้นที่เขตร้อนชื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.2 (Muneer and Saluja, 1985)

วิธีคำนวณหามุมเอียงแผ่นแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่เหมาะสม

การคำนวณหาค่ามุมเอียงแผ่นแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่เหมาะสมในการศึกษานี้จะกำหนดให้ 1 ปีมีจำนวน 365 วัน โดยเริ่มต้นการคำนวณปริมาณรังสีตกกระทบในระนาบเอียงจากวันที่ 1 ของปี และกำหนดใแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศใต้ มุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ตั้งแต่ -20 องศา ดังแสดงในแผนผังแสดงการคำนวณ (Figure 5) จากนั้นคำนวณหาปริมาณรังสีตกกระทบในระนาบเอียงดังแสดงในสมการที่ 3 จากผลรวมของรังสีกระจาย รังสีตรง และรังสีสะท้อนในระนาบเอียงดังสมการการที่ 4 สมการที่ 5 และสมการที่ 7 จากนั้นทำการปรับเพิ่มมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ขึ้น 1 องศา และคำนวณหาค่าปริมาณรังสีตกกระทบในแต่ละมุม ไปจนถึง 90 องศา เมื่อคำนวณหาปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ในระนาบเอียงครบตั้งแต่ -20 องศา จนถึง 90 องศา แล้วนั้นจะทำการคำนวณปริมาณรังสีตกกระทบในระนาบเอียงและมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ในวันถัดไปโดยเพิ่มขึ้นทุกๆ 1 วัน ไปจนครบ 365 วัน ซึ่งจะเห็นได้จากแผนผังแสดงการคำนวณ (Figure 5) เมื่อทราบปริมาณรังสีตกกระทบในระนาบเอียงตลอดทั้งปี และประมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยในการศึกษานี้กำหนดประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 18 เปอร์เซ็นต์

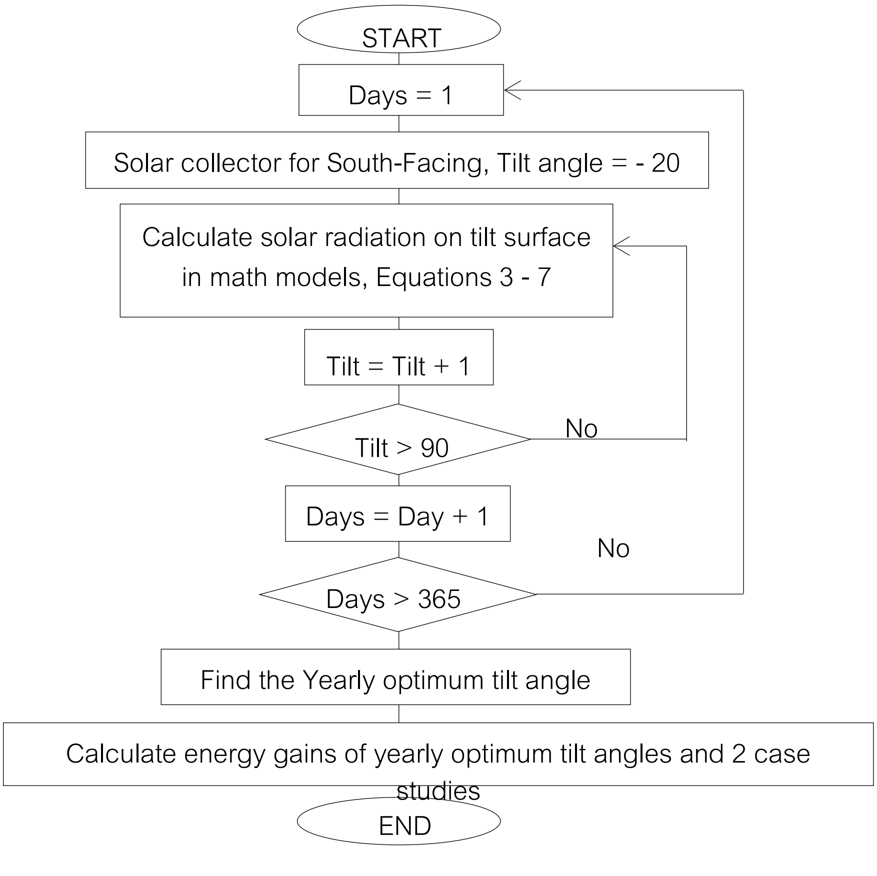


Figure 5 Simulation flowchart.

ในการวิจัยนี้จะหามุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยพิจารณามุมที่ส่งผลให้ปริมาณรังสีตกกระทบทั้งปีสูงสุด และเสนอแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ 2 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 การปรับมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ตามฤดูกาลโดยมีปรับมุม 3 ครั้งต่อปี โดยปรับมุมประจำฤดูร้อนจะเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคมไปจนถึง 30 มิถุนายน การปรับมุมประจำฤดูฝนจะเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคมไปจนถึงวันที่ 31ตุลาคม และการปรับมุมประจำฤดูหนาวจะเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายนไปจนถึง 28 กุมภาพันธ์ในปีถัดไป รูปแบบที่ 2 การปรับมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์รายเดือนจะปรับ 12 ครั้งต่อปี โดยจะทำการปรับมุมแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ในทุกวันที่ 1 ของแต่ละเดือน หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบพลังงานตกกระทบที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงการปรับมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ทั้ง 2 รูปแบบ กับการติดตั้งมุมเอียงขอนแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ในแนวระนาบ

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทยจะมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนเมษายน โดยมีค่าเฉลี่ยต่อวันอยู่ที่ 22.95 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวันและต่ำสุดในช่วงตุลาคมโดยมีค่าปริมาณรังสีเฉลี่ยต่อวันอยู่ที่ประมาณ 16.00 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน จากข้อมูลเฉลี่ยพบว่าช่วงเดือนสิงหาคมมีการกระจายตัวของข้อมูลสูงสุดโดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 2.01 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวันและมีค่าการกระจายตัวต่ำสุดในเดือนธันวาคม โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานยู่ที่ 0.47 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน

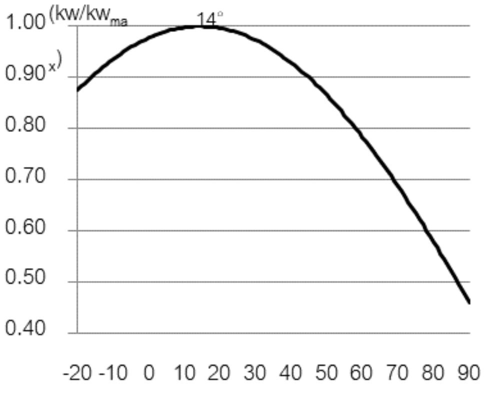


Figure 6 Solar radiations on tilt angles.

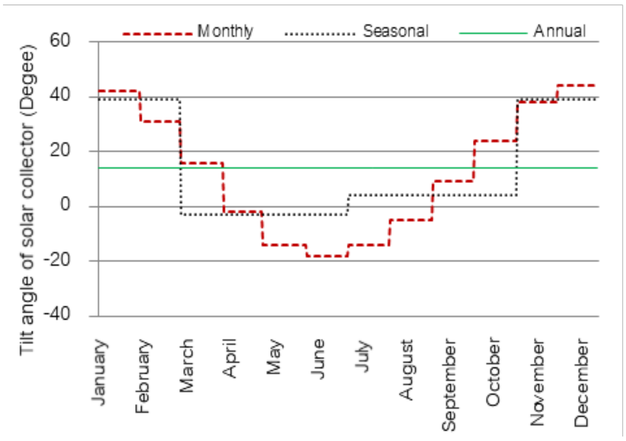


Figure 7 The Optimum tilt angles.

จากการศึกษาพบว่ามุมที่ส่งผลให้ค่าพลังงานสะสมสูงสุดประจำวันมีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดทั้งปี โดยมุมเอียงที่ให้ค่าพลังงานสะสมสูงสุดประจำวันจะมีค่าอยู่ในช่วง 47 องศา ถึง -20 องศา มุมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่มีค่าเป็นบวกจะอยู่ในช่วงกลางเดือนสิงหาคมไปจนถึงกลางเดือนเมษายนของปีหน้าและมุมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ให้พลังงานสูงสุดประจำวันมีค่าเป็นลบหรือมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศเหนือ จะอยู่ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม จากการศึกษาพบว่ามุมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ 14 องศา จะส่งผลให้พลังงานสะสมตลอดทั้งปีสูงสุด (Figure 6) โดยพลังงานที่ได้รับตลอดทั้งปีอยู่ที่ 2,402.46 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อปี โดยคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ประมาณ 432.44 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อปี เพิ่มขึ้น 2.28 % (Table 4) เมื่อเปรียบเทียบกับการติดตั้งที่ในแนวระนาบ หากพิจารณาการติดตั้งมุมของแผ่นรับ

รังสีดวงอาทิตย์มุมอื่นๆ พบว่าในกรณีการติดตั้งมุมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์อื่นๆ จะส่งผลพลังงานสะสมลดลงตามลำดับโดยมุม -20 องศา จะสามารถรับพลังงานสะสมทั้งปีคิดเป็น 88 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานสะสมสูงสุดและการติดตั้งแผ่นรับรังสีที่ 90 องศาจะสามารถรับพลังงานสะสมทั้งปีคิดเป็น 46 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานสะสมสูงสุด (Figure 6) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จากการปรับเปลี่ยนมุมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ 2 รูปแบบ ได้แก่การปรับมุมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ประจำเดือนและการปรับมุมแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ประจำฤดูกาล โดยในตารางที่ 3 (Table 3) ได้แสดงรายระเอียดของมุมที่ใช้ในการจำลองการปรับมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ มุมที่ให้พลังงานสูงสุดประจำปี มุมที่ใช้จำลองในแต่ละฤดูกาล และมุมเอียงที่ใช้ปรับในทุกวันที่ 1 ของแต่ละเดือน โดยรูปแบบช่วงเวลาการจำลองการปรับมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ ทั้งในกรณีการปรับมุมเอียงตามฤดูกาลหรือ 3 ครั้งต่อปี(Figure 7) และการปรับมุมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์รายเดือนหรือ 12 ครั้งต่อปี (Figure 7)

จากการจำลองดังกล่าวพบว่า การปรับมุมเอียงตามฤดูกาลสามารถรับพลังงานสะสมตลอดทั้งปีที่ 2,504.05 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อปี หากคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่าสามารถจะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 450.72 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อปี ซึ่งคิดเป็นพลังงานที่เพิ่มขึ้น 6.60 % (Table 4) เมื่อเปรียบเทียบกับการติดตั้งแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ในแนวระนาบ (Table 4) และการปรับมุมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์รายเดือน พบว่าสามารถรับพลังงานสะสมตลอดทั้งปีที่ 2,541.57 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อปี หากคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่าสามารถจะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 457.48 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อปี ซึ่งคิดเป็นพลังงานที่เพิ่มขึ้น 8.20% (Table 4) เมื่อเปรียบเทียบกับการติดตั้งแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ในแนวระนาบ

Table 3 Monthly, Seasonal and Annual optimum tilt angles.

Month	Annual (Degree)	Seasonal (Degree)		Months (Degree)
March		Summer	-3	16
April				-2
May				-14
June				-18
July	14	Rainy	4	-14
August				-5
September				9
October				25
November		Winter	39	38
December				44
January				42
February				31

Table 4 The Estimated gains in Annual, Seasonal, Month solar radiation in comparison to a horizontal surface.

Case	Energy on Surface (kW/m^2-Year)	Electrical energy (kW/m^2-Year)	Percent Gain %
Horizontal surface	2,348.98	422.82	-
Annual	2,402.46	432.44	2.28%
seasonal (3 time)	2,504.05	450.73	6.60%
Month (9 time)	2,541.57	457.48	8.20%

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำหนดมุมแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ให้พลังงานสะสมตลอดทั้งปีสูงสุดและนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ จากการปรับเปลี่ยนมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ 2 รูปแบบ จากการศึกษานี้สรุปได้ว่า

1. มุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ให้ค่าพลังงานสะสมสูงสุดอยู่ที่ 14 องศา ซึ่งสามารถรับพลังงานสะสมตลอดทั้งปีที่ 2,402.46 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อปีหรือคิดเป็น 2.28 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการติดตั้งในแนวระนาบ (Table 4)

2. กรณีการติดตั้งมุมของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ในมุมอื่นๆ จะส่งผลให้พลังงานที่ผลิตได้ลดลงตามลำดับโดยมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ 90 องศา ให้ค่าพลังงานสะสมตลอดทั้งปีต่ำสุดคิดเป็น 46 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ให้ค่าพลังงานสะสมสูงสุด (Figure 6)

3. การปรับมุมเอียงแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์รายฤดูกาล (3 ครั้งต่อปี) จะส่งผลให้พลังสะสมตลอดปีที่ 2,504.05 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อปี หรือคิดเป็น 6.06 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการติดตั้งในแนวระนาบ

4. การปรับมุมเอียงแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์รายเดือน (12 ครั้งต่อปี) จะส่งผลให้พลังสะสมตลอดปีที่ 2,541.57 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อปี หรือคิดเป็น 8.20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการติดตั้งในแนวระนาบ

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการติดตั้งแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ที่มุม 14 องศา จะส่งผลให้พลังงานสะสมทั้งปีสูงสุดและจะลดลงตามลำดับเมื่อติดตั้งในมุมอื่นๆ ที่ต่างออกไป จากแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพจากการปรับมุมเอียงของแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ตามฤดูกาลหรือ 3 ครั้งต่อปี และการปรับมุมเอียงในทุกเดือนหรือ 12 ครั้งต่อปี สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเคมีและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์ และขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลปริมาณรังสีดวงอาทิตย์

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2562. **กระทรวงพลังงาน** (Online). https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=48247, 24 ตุลาคม 2562

สำนักนโยบายและแผนพลังงาน. 2561. รายงานสถิติพลังงานประจำปี. **กระทรวงพลังงาน** (Online). http://www.eppo.go.th/index.php/th/, 15 พฤศจิกายน 2562

Benjamin Y.H., R. Liu and C. Jordan. 1990. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy** 4: 1-19

Chang, Y.-P. 2010. Optimal the tilt angles for photovoltaic modules in Taiwan. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems** 32 (9): 956-964.

Cooper P.I. 1996. The absorption of radiation in solar stills. **Solar Energy**, 12: 333-346

Ibrahim, A. 2013. Estimation of solar irradiance on tilted surfaces facing south for Tanta, Egypt. **International Journal of Sustainable Energy** 32: 111-120

Jafarkazemi, F., S.A. Saadabadi and P. Hadi. 2012. Optimum tilt angle and orientation of solar surfaces in Abu Dhabi. **UAE, Renewable Energy** 56: 44-49.

Jamil, B., A.T. Siddiqui and N. Akhtar. 2016. Estimation of solar radiation and optimum tilt angles for south-facing surfaces in Humid Subtropical Climatic Region of India. **Engineering Science and Technology, an International Journal** 19 (4): 1826-1835

Kamal, S. 2009. Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria. **Energy Conversion and Management**, 50: 2439-2448.

Mohd A.B. and A.Q. Malik. 2001. Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam. **Renewable Energy** 24 (2): 233-234.

Muneer, T. and G.S. Saluja. 1985. A brief review of models for computing solar radiation on inclined surfaces. **Energy Conversion and Management** 25: 433-458

Rowlands, I.H., B.P. Kemery, and I. Beausoleil-Morrison. 2010. Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: An Ontario (Canada) case-study. **Energy Policy**, 49: 1397-1409.

Tarek O.K. 2016. On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 65: 626-634.

การใช้ประโยชน์จากผงอิฐทนไฟทดแทนปูนซีเมนต์

Replacement of Cement in Concrete with Fire Brick Powder

<u>อภิรัฐ ฉัตรานุสรณ์</u>[1*] และ ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา[1]

<u>Apirath Chattranusorn</u>[1*] and Patcharaporn Suwanvitaya[1]

บทคัดย่อ

ผงอิฐทนไฟเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตอิฐทนไฟ มีคุณสมบัติ และ องค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงปูนซิเมนต์ การศึกษานี้จึงนำผงอิฐทนไฟมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุทดแทนปูนซิเมนต์ ทำการทดลองใช้ผงอิฐทนไฟกับปูนซิเมนต์ โดยแปรผันสัดส่วนผสม สภาวะการบ่ม (ในน้ำ และ ในอากาศ) และ ระยะเวลาบ่ม เพื่อหาผลที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของผงอิฐทนไฟมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมผงอิฐทนไฟมีแนวโน้มลดลง ขณะที่การเพิ่มระยะเวลาบ่มทำให้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมผงอิฐทนไฟเพิ่มขึ้น และการบ่มซีเมนต์ผสมผงอิฐทนไฟในน้ำช่วยเพิ่มกำลังอัดได้ดีกว่าการบ่มในอากาศ โดยกำลังรับแรงอัดจะมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนของผงอิฐทนไฟเท่ากับ 90PC/10FP ที่อายุ 28 วัน ที่ผ่านการบ่มในน้ำและในอากาศ มีค่าเท่ากับ 366.06 ksc และ 339.76 ksc ตามลำดับ

ABSTRACT

Fire brick powder was a waste from fire brick production. Its properties and chemical composition were similar to those of Portland cement. This study aimed to utilize fire brick waste powder as cement replacement. Fire brick powder was mixed with cement at varying ratio. The effect of curing conditions (in water and in air) and curing times on compressive strength of the specimen were compared. It was found that increase in fire brick proportion resulted in decrease in compressive strength. Compressive strength development was normal in all mixes, increased with curing time. Curing in water gave a slightly better result than curing in air. Compressive strength was highest in the 90PC/10FP ratio, 366.06 and 339.76 ksc were achieved at 28 days curing in water and in air, respectively.

Key words: fire brick powder, compressive strength, ratio by weight of cement

*Corresponding author; e-mail address: kantrachai@gmail.com

[1]สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Faculty of Environment Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

อิฐทนไฟเป็นวัสดุทนไฟชนิดหนึ่งซึ่งมาจากผลผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมเซรามิคที่ ไม่เฉพาะแต่ในงานอุตสาหกรรมเซรามิคเท่านั้น ยังสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมต่างๆที่ต้องใช้ความร้อนสูงในการผลิต เช่น เตาเผาผลิตไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเตาหลอมโลหะในอุตสาหกรรมเหล็กและอุตสาหกรรมอื่นๆอีกมากมาย การใช้อิฐทนไฟส่วนใหญ่ใช้ใน งานก่อสร้างเตาเผาชนิดต่างๆ รูปลักษณะและขนาดของอิฐจึงมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมสำหรับการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อแรงอัดและแรงเฉือนได้ดี ทำให้มีการนำไปใช้งานต่าง ๆ กัน เช่น ลดอุณหภูมิภายในอาคาร ลดเวลาในการก่อสร้าง เนื่องจากเพราะน้ำหนักเบาสามารถตัดแต่งได้ง่ายใช้ในการก่อผนัง เป็นต้น วัสดุที่ใช้มักประกอบด้วย ดินเหนียว (Plastic Clay) ดินทนไฟ (Fire Clay) ดินเกาลิน (Kaolin) หรือ ดินขาว (White Clay) และวัสดุอื่นๆ ตามแต่ละชนิดและการนำไปใช้ อิฐทนไฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดใหญ่ๆ คือ อิฐทนไฟเชิงด่าง (Basic Brick) อิฐทนไฟอะลูมิน่าสูง (High Alumina Brick) อิฐทนไฟไฟล์เคลย์ (Fire Clay Brick) และอิฐทนไฟ (Fire Brick) ในขั้นตอนกระบวนการผลิตอิฐทนไฟจะมีเศษฝุ่นเนื่องจากการตัดแต่งก้อนอิฐเพื่อให้ได้ขนาดตามมาตรฐานของโรงงานคิดเป็น ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตที่ได้ ถึงแม้ว่าปัจจุบันจะเริ่มมีการนำเศษผงที่ได้จากการตัดแต่งอิฐกลับมาใช้ผลิตอิฐทนไฟอีกครั้ง แต่คุณภาพอิฐทนไฟที่ได้ไม่สามารถเทียบเท่ากับอิฐทนไฟในกระบวนการผลิตตอนต้นได้ รวมทั้งต้องใช้ต้นทุนที่สูงมากขึ้นเพื่อปรับประสิทธิภาพของก้อนอิฐดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพตามมาตรฐานโรงงาน จึงมีแนวคิดที่จะนำเศษฝุ่นอิฐทนไฟดังกล่าวนี้มาใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ เนื่องจากซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานสูงมาก ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) ในปริมาณมากถึง 0.7 ตันต่อทุกๆ 1 ตันของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้น เป็นสาเหตุของการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการเกิดภาวะเรือนกระจก มากถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาในบรรยากาศทั้งหมด เพื่อที่จะหาวัสดุที่สามารถนำมาทดแทนหรือนำมาชดเชยในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อจะนำมาใช้ทดแทนซีเมนต์ในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ซีเมนต์ผสมผงอิฐทนไฟที่มีกำลังอัดที่สูง
2. เพื่อหาและเปรียบเทียบผลของการบ่มในน้ำและในอากาศที่มีต่อคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ผงอิฐทนไฟ (Fire Brick Powder : FP)

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตคือ ผงอิฐทนไฟ มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียดลักษณะคล้ายแป้งฝุ่นดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งได้จากเศษการตัดแต่งอิฐทนไฟให้มีรูปทรงและมีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากันทุกก้อนเพื่อสะดวกในการบรรจุและขนส่งไปยังที่ต่าง ๆ

Figure 1 Fire brick powder.

คุณสมบัติพื้นฐานของผงอิฐทนไฟ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.82 ความละเอียดของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 36-90 ไมโครเมตร และประกอบไปด้วยอะลูมิโนลิเกตเป็นหลัก มีปริมาณรวมโดยน้ำหนักของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 97.13 และ K_2O ร้อยละ 1.62 ตรวจสอบด้วยวิธี XRF ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Chemical composition of Fire Brick Powder by XRF (X-ray fluorescence).

Chemical composition of Fire Brick Powder	(Percent %)
Silicon dioxide (SiO_2)	54.700
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	41.000
Potassium Oxide (K_2O)	1.620
Iron Oxide (Fe_2O_3)	1.430
Calcium Oxide (CaO)	0.302
Magnesium Oxide (MgO)	0.252
Sodium Oxide (Na_2O)	0.118
Sulfur Trioxide (SO_3)	0.089

Table 2 Mixed proportion.

Sample	Ratio by weight	
	Portland Cement (PC)	Fire Brick Powder (FP)
1) 100PC0IFD	100	0
2) 90PC10IFD	90	10
3) 80PC20IFD	80	20
4) 70PC30IFD	70	30
5) 60PC40IFD	60	40
6) 50PC50IFD	50	50

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ของชุดตัวอย่าง

- FP หมายถึง ฝุ่นอิฐทนไฟ (Fire Brick Powder)
- ตัวเลข xx หน้า FP หมายถึง อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักรวม

การเตรียมตัวอย่าง

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเริ่มต้นด้วยการผสมผงอิฐทนไฟกับซีเมนต์ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำในขณะผสมให้มีค่าความข้นเหลวปกติตามมาตรฐาน ASTM 187 จากนั้นจึงแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน

ส่วนแรก นำไปเข้าแบบเพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวแรกเริ่ม และการก่อตัวสุดท้าย การทดสอบระยะการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมผงอิฐทนไฟใช้วิธีการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งเป็นการทดสอบด้วยเข็มไวแคต (Vicat Needle Modified Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C 191-82 ซึ่ง

กำหนดให้ระยะเวลาก่อตัวแรกเริ่ม เป็นระยะเวลาที่ เมื่อปล่อยเข็ม Vicat ขนาด 1 มม. เข็ม Vicat จะจมลงในชิ้นตัวอย่างได้ลึก 10 มม. และ กำหนดให้ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย เป็นระยะเวลาที่ เมื่อปล่อยเข็ม Vicat จะไม่จมลงในชิ้นตัวอย่างได้เลย

ส่วนที่สอง นำไปเทลงในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร นำไปตั้งบนเครื่องเขย่า เพื่อไล่ฟองอากาศออก แล้วจึงปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบ คลุมผิวตัวอย่างในแบบหล่อไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนถอดแบบ แล้วนำไปบ่ม ในน้ำ และในอากาศ แล้วจึงนำไปทดสอบหากำลังรับแรงอัดที่ 7, 14 และ 28 วันต่อไป

ผลการศึกษา

การทดสอบหาค่าความข้นเหลวปกติ

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมซีเมนต์เพสต์ผสมผงอิฐทนไฟเพื่อให้ได้ซีเมนต์เพสต์ที่มีความข้นเหลวปกติ ได้แสดงไว้ใน Figure 2

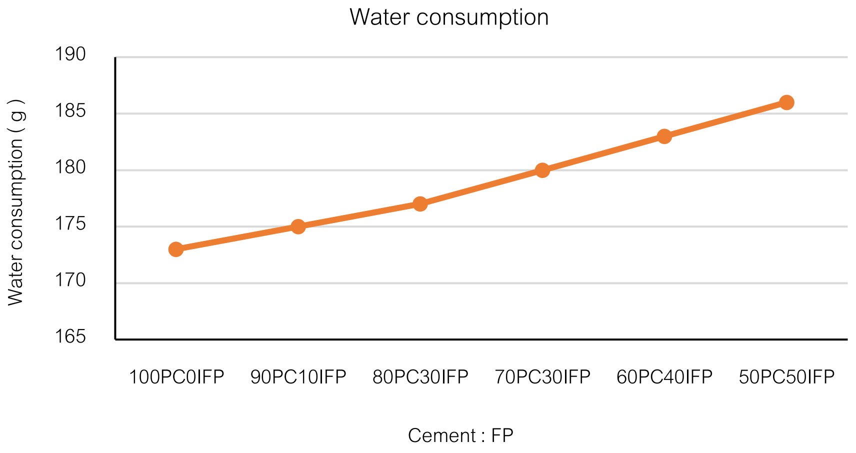


Figure 2 Normal consistency of Hydraulic cement: FP.

จะเห็นได้ว่า เมื่อสัดส่วนของผงอิฐทนไฟมีมากขึ้น ปริมาณน้ำที่จะต้องใช้ผสมเพื่อให้ได้ซีเมนต์เพสต์ที่มีความข้นเหลวปกติก็จะมากขึ้นไปด้วย ทั้งนี้ เพราะการที่ผงอิฐทนไฟมีความละเอียดสูงพื้นที่ผิวจำเพาะจึงมีค่ามากไปด้วย พื้นที่ที่จะดูดซับน้ำจึงมากขึ้นตามสัดส่วนการผสม

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสมผงอิฐทนไฟที่อัตราส่วนต่างๆ ได้แสดงไว้ใน Figure 3 จะเห็นได้ว่าซีเมนต์เพสต์ต่อผงอิฐทนไฟมีระยะเวลาการก่อตัวที่ระยะเริ่มต้นและการก่อตัวที่ระยะสุดท้ายใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ทั่วๆไป ทั้งนี้เนื่องจากถึงแม้ผงอิฐทนไฟจะมีซิลิก้า (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) อยู่ แต่ไม่ได้อยู่ในสภาพที่มีความไวต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เมื่อผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ในช่วงแรกๆจึงไม่ได้ช่วยในการทำปฏิกิริยาดังกล่าว การก่อตัวจึงได้มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์แต่ฝ่ายเดียว เมื่อสัดส่วนของปูนซีเมนต์ลดลง การก่อตัวจึงต้องใช้เวลานานขึ้น

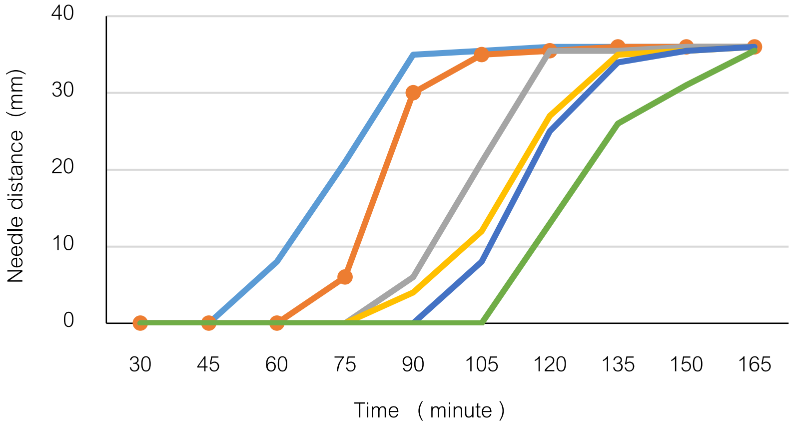
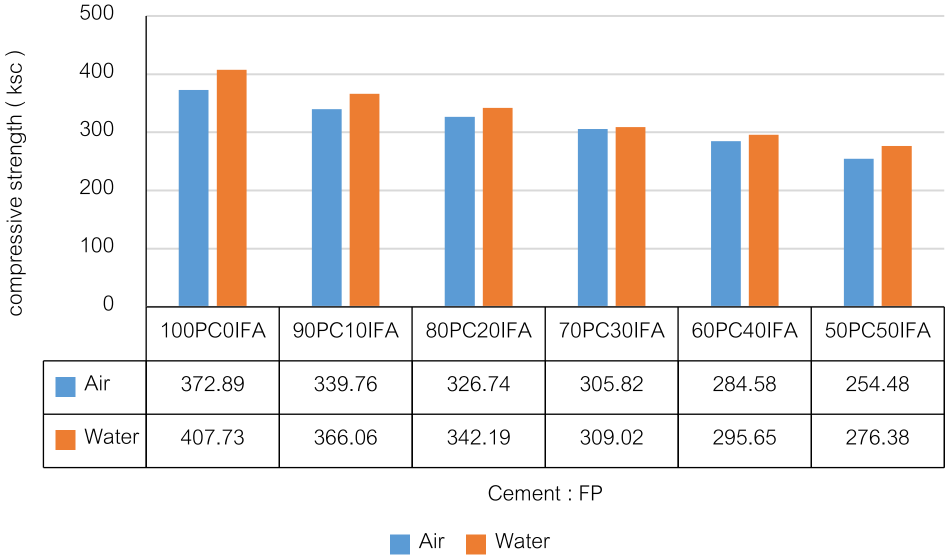


Figure 3 Setting time of cement by Vicat.

Figure 3 แสดงผลการทดสอบการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ต่อผงอิฐทนไฟ มีระยะเวลาการก่อตัวที่ระยะเริ่มต้นและการก่อตัวที่ระยะสุดท้ายที่ยาวนานมากเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ทั่วๆ ไป ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อผงอิฐทนไฟมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อผงอิฐทนไฟลดลง ทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้มากขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาก่อตัวนานขึ้น

การทดสอบกำลังรับแรงอัด



	100PC0IFA	90PC10IFA	80PC20IFA	70PC30IFA	60PC40IFA	50PC50IFA
Air	372.89	339.76	326.74	305.82	284.58	254.48
Water	407.73	366.06	342.19	309.02	295.65	276.38

Figure 4 The compressive strength of cement paste: Fire Brick Powder at 28 days.

Figure 4 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของชิ้นตัวอย่าง ที่อายุ 28 วัน หลังจากผ่านการบ่มแบบบ่มในน้ำเมื่อเทียบกับแบบบ่มในอากาศ และ Figure 5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของชิ้นตัวอย่าง ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน จากการบ่มทั้งสองแบบ

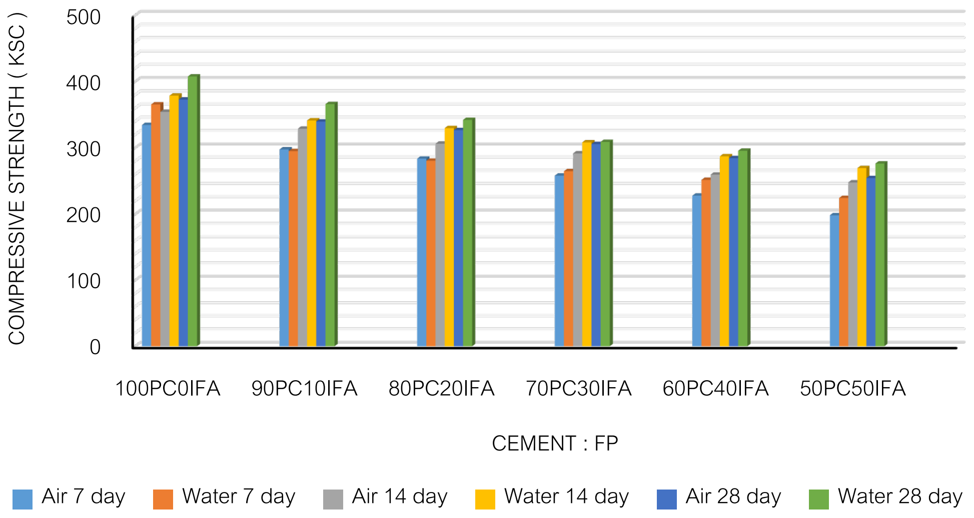


Figure 5 The compressive strength of cement paste: Fire Brick Powder at 7, 14, 28 days.

จะเห็นได้ว่าการบ่มทั้งสองแบบช่วยในการพัฒนากำลังของซีเมนต์ผสมเป็นอย่างดี และแม้ว่าการบ่มในอากาศจะให้ค่ากำลังต่ำกว่าการบ่มในน้ำ แต่ส่วนต่างก็อยู่ในระดับค่อนข้างน้อย จากการพิเคราะห์อัตราการพัฒนากำลัง จะเห็นได้ว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก ในช่วงหลัง แม้อัตราการพัฒนากำลังจะลดลง แต่กำลังอัดก็ยังมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

สรุป

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ต่อผงอิฐทนไฟสามารถสรุปได้ว่า

1. การเพิ่มสัดส่วนของผงอิฐทนไฟมีผลทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำมากขึ้นในการผสมให้ได้ปูนผสมอยู่ในสภาวะความข้นเหลวปกติ

2. สัดส่วนของผงอิฐทนไฟไม่มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อการก่อตัวแรกเริ่ม แต่มีผลต่อการก่อตัวสุดท้าย การเพิ่มสัดส่วนของผงอิฐทนไฟจะทำให้เพิ่มเวลาการก่อตัวสุดท้าย

3. การบ่มในอากาศ จะทำให้ได้ค่ากำลังอัดของปูนผสม ต่ำกว่าเมื่อบ่มในน้ำเล็กน้อย

4. การเพิ่มสัดส่วนของผงอิฐทนไฟมีผงทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ค่ากำลังอัดที่สูงสุดของปูนผสมอยู่ที่อัตราส่วน 90PC/10FP มีค่าเท่ากับ 366.06 ksc และ 339.76 ksc เมื่อบ่มในน้ำและในอากาศ ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

ธนากร ภูเงินขำ และ ธีรวัฒน์ สินศิริ. 2554. การศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ. **วารสารวิจัยและพัฒนา** 34: 36-37.

Chindaprasirt, P., T. Chareerat and V. Sirivivatnanon. 2007. Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. **Cement and Concrete Composite** 29: 224-229.

Hardjito, D. and B.V. Rangan. 2005. **Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete**. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Research Report GC1, Perth, Australia

Duxson, P., A. Fernandez-Jimenez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo and J.S.J. Van Deventer. 2007 **Geopolymer Technology.** The Current State of The Art Journal of Materials Science. 2917-2933.

Bakharev, T. 2005. Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. **Cement and Concrete Research** 35: 1233-1246.

Fernandez-Jimenez, A. and A. Palomo. 2003. **Characterisation of Fly Ashes: Potential Reactivity as Alkaline Cements. Fuel.** 82: 2259-2265.

ASTM C191-13. 2013. **Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle ASTM International.** West ConshohoCken, PA.

ASTM C187-11e1. 2011. **Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste.** ASTM International, West ConshohoCken, PA.

การประยุกต์ใช้แบบจำลองการไหล 2 มิติ Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) ในการพยากรณ์น้ำท่าและน้ำท่วม กรณีศึกษาพื้นที่วังตะไคร้

An Application of Two-Dimensional Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model for Flood Forecasting: A Case Study of Wang Ta Krai, Nakhon Nayok Province

ภัทรพล มณีแดง[1] อดิชัย พรพรหมินทร์[1]และ ดนย์ปภพ มะณี[1*]

Pattaraphon Maneedang[1], Adichai Pronprommin[1] , and Donpapob Manee[1*]

บทคัดย่อ

สภาพพื้นที่ตอนบนของลุ่มน้ำนครนายกมีลักษณะกายภาพที่มีความชันมากในช่วงต้นน้ำ และลดระดับความลาดชันลงอย่างรวดเร็ว หากปริมาณฝนที่ตกลงมาติดต่อกันเป็นเวลานานทำให้ปริมาณน้ำสะสมจะส่งผลให้ระดับน้ำสูงขึ้นอย่างฉับพลันและไหลเข้าในพื้นที่วังตะไคร้อย่างรวดเร็ว การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาพการไหลของน้ำหลากที่เกิดขึ้นในพื้นที่วังตะไคร้โดยใช้ แบบจำลองการไหล 2 มิติ Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) โดยใช้ข้อมูลฝนจากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่น้ำนครนายก พบว่าพื้นที่ศึกษามีปริมาณฝนรายปีเฉลี่ย 805.44 มม. ปริมาณฝนสูงสุดรายเดือนเกิดขึ้นที่เดือน สิงหาคม มีค่าเฉลี่ย 13.16 มม./วัน ซึ่งผลการวิจัยโดยการจำลองแบบจำลอง RRI เพื่อวิเคราะห์เหตุการณ์น้ำท่วมปี ค.ศ. 2018 แสดงผลน้ำหลาก ณ ที่สถานีตรวจวัดน้ำท่า NY1B ในวันที่ 28 สิงหาคม ค.ศ.2018 พบว่ามีค่าอัตราการไหลของน้ำสูงสุด อยู่ที่ 251.83 ลบ.ม./วินาที (ค่าที่ตรวจวัดได้ 248.00 ลบ.ม./วินาที) และมีความลึกน้ำสูงสุดอยู่ที่ 2.32 เมตร (ค่าที่ตรวจวัดได้ 2.15 เมตร) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีศักยภาพที่จะสามารถนำไปใช้เตือนภัยเฝ้าระวังน้ำท่วมได้

ABSTRACT

The upper area of Nakhon Nayok Basin has very steep physical appearance in the upstream area. And quickly reduced the slope level If the amount of rain that falls for a long time causes the water to accumulate, it will cause the water level to rise suddenly and flow into the area of Wang Ta Khrai district. This research aims to study the flow condition of the flooding that will occur in the Wang Ta Khrai area by using a 2-dimensional flow model Rainfall-Runoff-Inundation (RRI). The input rainfall data from the rain gauge station was used in the Nakhon Nayok River Basin. The annual average rainfall of study area is 805.44 mm. The maximum average monthly rainfall is 13.16 mm./day. The results of simulating the RRI model for analyzing the flooding in 2018 at the outlet point of runoff station on 28th August 2018 found that the maximum discharge is 251.83 cubic meters / second (observed value is 248.00 cubic meters/second) and the maximum hydraulics head is 2.32 meters (observed value is 2.15 meters). The results of this study show that the model has a potential to be used in flood early warning.

Key words: rainfall-runoff Inundation (RRI model), flood early warning, nakhon nayok river basin

* Corresponding author; e-mail address: **Donpapob.m@ku.th**

[1] ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การเกิดอุทกภัยที่ผ่านมาของพื้นที่วังตะไคร้ มีสาเหตุส่วนใหญ่มาจากปริมาณฝนที่ตกลงมาติดต่อกันเป็นเวลานานทำให้เกิดน้ำสะสม ส่งผลให้น้ำป่าไหลหลากจากอุทยานเขาใหญ่มาทางคลองมะเดื่อไหลรวมสู่น้ำตกวังตะไคร้ ทำให้ระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและไหลเข้าคลองวังตะไคร้อย่างรวดเร็วทำให้บริเวณพื้นที่วังตะไคร้ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วม จากเหตุการณ์ช่วง-เดือนสิงหาคม ปี ค.ศ. 2019 น้ำป่าไหลหลากจากเขตอุทยานเขาใหญ่ มาทางคลองมะเดื่อไหลรวมลงสู่น้ำตกวังตะไคร้ ทำให้ระดับน้ำเพิ่มความสูงมากอย่างรวดเร็วและไหลเข้าท่วมรีสอร์ท ร้านค้าริมคลองวังตะไคร้อย่างรวดเร็ว เป็นเหตุทำให้รีสอร์ทและร้านค้าริมคลองเสียหายเป็นจำนวนมาก โดยน้ำป่าไหลหลากเข้าท่วมบริเวณพื้นที่ ต.สาริกา และ ต.หินตั้ง อ.เมือง จ.นครนายก เนื่องจากในช่วงระยะเวลาดังกล่าวเกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักติดต่อกันเป็นเวลานานหลายชั่วโมง ด้วยเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นรวดเร็วทำให้ประชาชน นักท่องเที่ยว ผู้ประกอบการในพื้นที่ไม่สามารถที่จะรับมือได้อย่างทันท่วงที ในการศึกษาครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของผลิตภัณฑ์น้ำฝน – น้ำท่า และการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์น้ำฝน Rainfall – Runoff – Inundation (RRI) ในการพยากรณ์น้ำท่าและน้ำท่วม

ลักษณะพื้นศึกษา

ที่ตั้งและสภาพภูมิประเทศ

วังตะไคร้ตั้งอยู่ในเขตลุ่มแม่น้ำนครนายก มีพื้นที่รับน้ำ 520 ตารางกิโลเมตร สภาพภูมิประเทศโดยทั่วไปของจังหวัดประมาณร้อยละ 60 มีลักษณะเป็นที่ราบลุ่ม มีพื้นที่ลาดชันสูงประมาณร้อยละ 29 ตอนบนมีต้นกำเนิดอยู่ในเขตอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่จากบริเวณต้นน้ำจนถึง อ่างเก็บน้ำคลองท่าด่าน มีลักษณะเป็นหุบเขาแคบและมีพื้นที่สูงชัน (สำนักบริหารโครงการ .2561)

ภูมิอากาศ

พื้นที่ลุ่มน้ำแม่น้ำนครนายกอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนี้ยังมีพายุดีเปรสชั่นและพายุไต้ฝุ่น ซึ่งมาจากทะเลจีนใต้พัดเข้ามาเป็นครั้งคราว ส่งผลทำให้เกิดฤดูกาลต่างๆ อาทิ ฤดูฝนจะเกิดในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ทิศทางและช่วงเวลาของการเกิดลมมรสุมและลมพายุจรที่พัดผ่านพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลน้ำฝน

จากการรวบรวมข้อมูลน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝนของกรมชลประทานและกรมอุตุนิยมวิทยาในบริเวณพื้นที่ทำการศึกษา พบว่ามีจำนวน 3 สถานี ดังแสดง Table 1

Table 1 Rainfall station in the study area

No.	Station	Name Station	Year period	Frequency	Average annual rainfall (mm.)			Department
					Maximum	Minimum	Mean	
1	22341	Khao Nang Buat (Ny.1B) T. Sarika, A. Muang	2000-2018	Daily	2,263.20	96.30	1,247.79	Royal Irrigation
2	44301	Heo Narok (Ny.4), A. Muang	2000-2018	Daily	3,825.00	2,269.16	54.80	Royal Irrigation
3	25931	Huai Krok De, Nakhon Ratchasima	2000-2018	Daily	1,687.60	381.00	1,067.44	Royal Irrigation
		Average			817.93	748.99	805.44	

ข้อมูลน้ำท่า

จากการรวบรวมข้อมูลน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝนของกรมชลประทานในบริเวณพื้นที่ทำการศึกษา ทำการรวบรวมข้อมูลสถิติมีปริมาณน้ำไหลสูงสุดรายปีเฉลี่ยช่วงปี 20 ปีย้อนหลังของกรมชลประทาน ดังแสดงใน Table 2 และ Figure 1

Table 2 Runoff station in the study area.

No.	Station	Name Station	River Basin	watershed (Km^2)	Year period	Average annual runoff (MCM)			Department
						Maximum	Minimum	Mean	
1	Ny.1B	Ban Khao Namg Buat	Nakhon Nayok	519.00	2000-2018	117.73	1,149.25	662.73	Royal Irrigation
2	Ny.4	Ban Noen Hom	Nakhon Nayok	128.00	2000-2018	177.68	463.13	269.89	Royal Irrigation

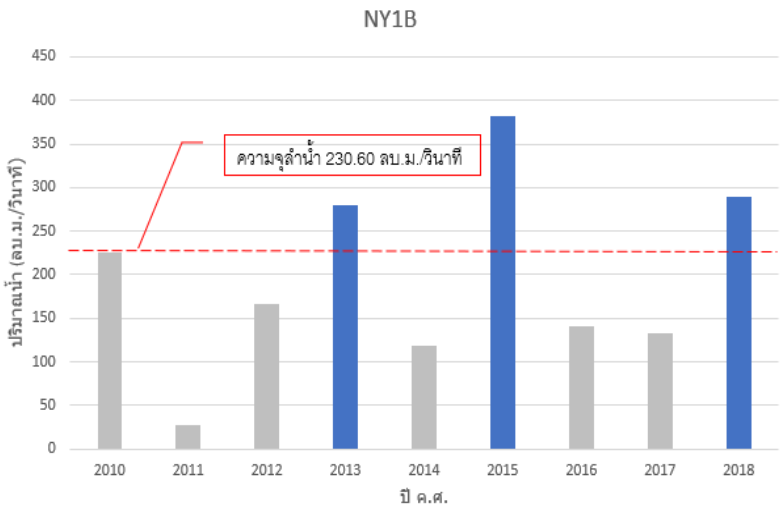


Figure 1 The annual momentary peak of Nakhon Nayok River during period 2010-2018 at Ny1B station

Source: Royal Irrigation Department.

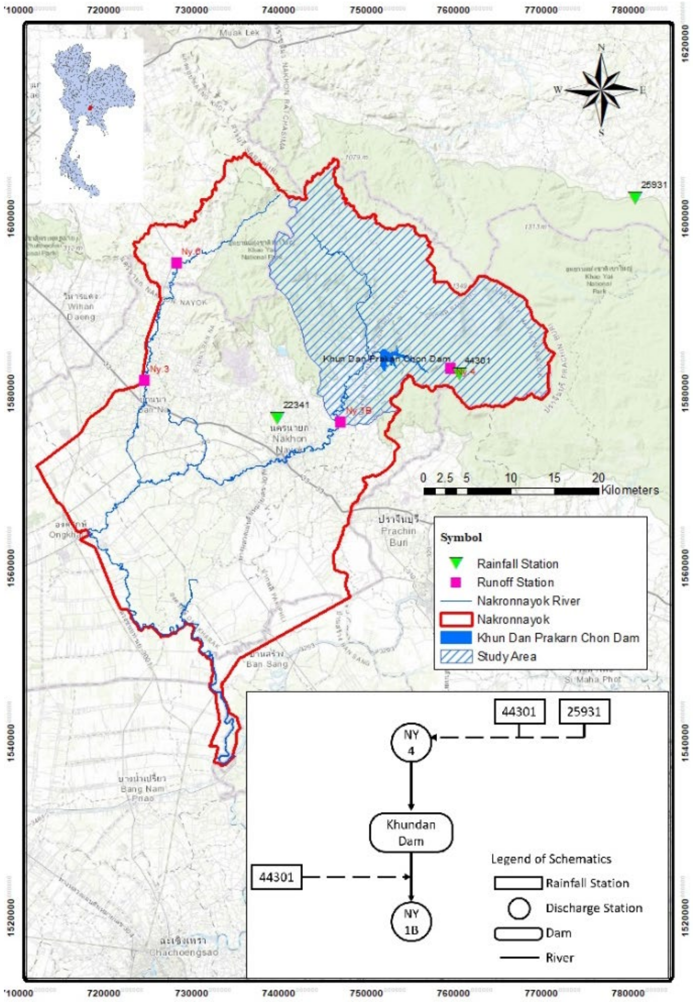


Figure 2 Study area and schematic river network diagram.

แบบจำลอง Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้แบบจำลอง Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) เป็นแบบจำลองที่สามมารถจำลองสภาพน้ำฝน - น้ำท่า และน้ำหลากพร้อมกัน จัดอยู่ในแบบจำลองแบบกระจายตัว (Distributed Model) พัฒนาขึ้นโดย Dr. Sayama และคณะ (Sayama *et al*., 2017) Figure 3 แสดงถึงภาพรวมของข้อมูลนำเข้าและผลลัพธ์ที่ได้ โดยเริ่มต้นจากข้อมูลโครงข่ายทางกายภาพสำหรับแบบจำลอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะความชันของภูมิประเทศ และแยกลำน้ำในการพิจารณาสำหรับในแต่ละตำแหน่งการคำนวณโดยในแต่ละตำแหน่งนั้นจะให้พิกัดของลำน้ำในตำแหน่งการคำนวณเดียวกัน ลำน้ำจะถูกแยกคำนวณเป็นการไหล 1 มิติ ตลอดเส้นศูนย์กลางของตำแหน่งการคำนวณการไหลด้านข้าง (lateral flow) คำนวณภายในตำแหน่งการคำนวณด้วยแบบจำลอง 2 มิติ โดยที่ตำแหน่งการคำนวณที่มีลำน้ำไหลผ่านจะมีความลึกของน้ำ 2 ค่า ได้แก่ความลึกของน้ำในลำน้ำ (Channel depth) และความลึกของน้ำในที่ราบน้ำท่วม (floodplain depth) ความสัมพันธ์ระหว่างการไหลเข้าและออกจากลำน้ำจะคำนวณจากสมการทางชลศาสตร์ซึ่งขึ้นกับเงื่อนไขของระดับน้ำและความสูงของคันกั้นน้ำ

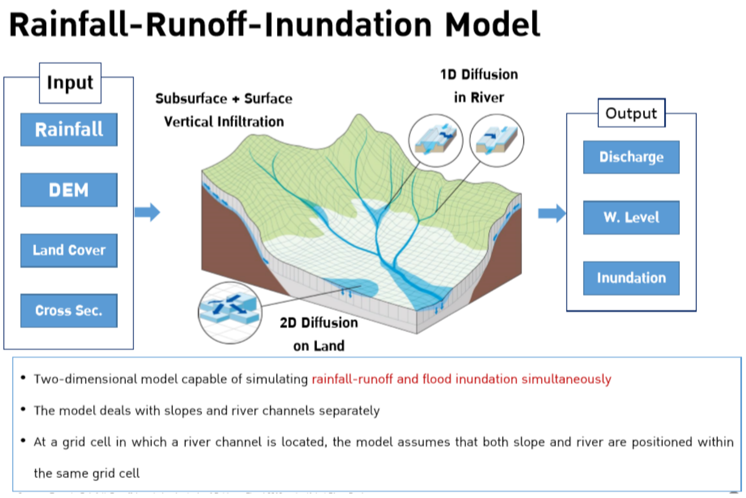


Figure 3 Schematic diagram of model RRI (Sayama, *et al*., 2010).

สมการที่ใช้ในแบบจำลอง RRI คือ สมการสมดุลน้ำ (mass balance equation) และสมการสมดุลโมเมนตัม (momentum equation) ดังแสดงในสมการที่ 1.1 1.2 และ 1.3 ตามลำดับ

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=r-f \qquad (1.1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t}+\frac{\partial u q_x}{\partial x}+\frac{\partial v q_x}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial x}-\frac{T_x}{\rho_w} \qquad (1.2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t}+\frac{\partial u q_y}{\partial x}+\frac{\partial v q_y}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial y}-\frac{T_y}{\rho_w} \qquad (1.3)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของระดับน้ำจากระดับท้องน้ำ

q_x และ q_y คือ ยูนิตความกว้างของอัตราการไหลต่อความกว้างในทิศทางแกน x และแกน y

u และ v คือความเร็วการไหลในทิศทางแกน x และแกน y

r คือ ความเข้มฝน (rainfall intensity)

f คือ อัตราการซึมของน้ำ (infiltration rate)

H คือ ความสูงของน้ำจากระดับอ้างอิง

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ

g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดโลก

T_x และ T_y คือ ความเค้นเฉือน (Shear stresses) ในทิศทางแกน x และแกน y

วิธีการ

ขั้นตอนการศึกษามีดังนี้ โดยเริ่มต้นจากการรวบรวมข้อมูลน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน (สถานี 22341,44301และ25931) และข้อมูลน้ำท่าจากสถานีตรวจวัดน้ำท่า (สถานี NY1B และ NY4) ในพื้นที่ลุ่มน้ำ และทำการปรับแก้ความแม่นยำของข้อมูลน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่น้ำนครนายก หลังจากนั้นขั้นตอนการการสอบเทียบแบบจำลอง RRI ในการพยากรณ์น้ำท่าและน้ำท่วม ส่วนขั้นตอนสุดท้ายในศึกษาสภาพการไหลของน้ำหลากที่เกิดขึ้นในพื้นที่วังตะไคร้และการสรุปผลของการศึกษา

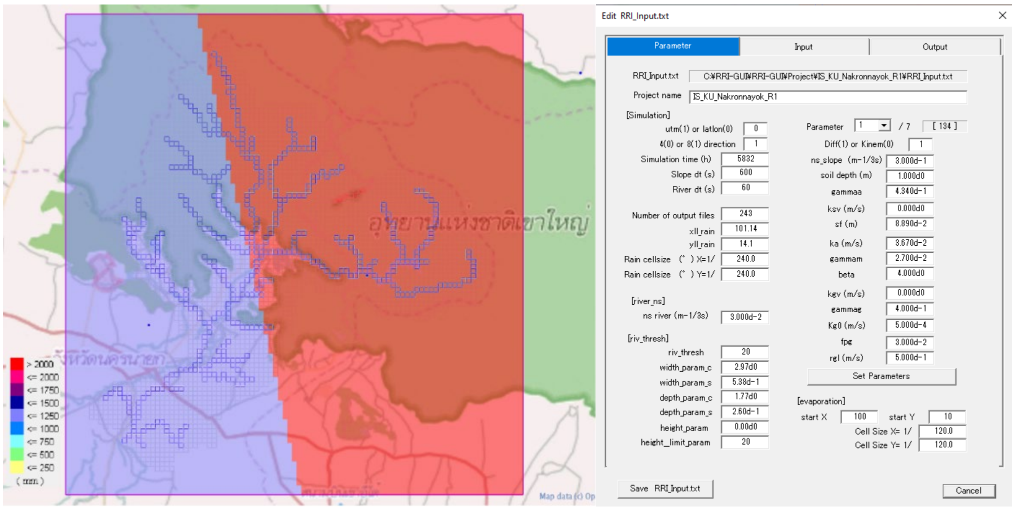


Figure 4 Thiessen polygon and the list of parameter of RRI model in Wang tra Krai study area.

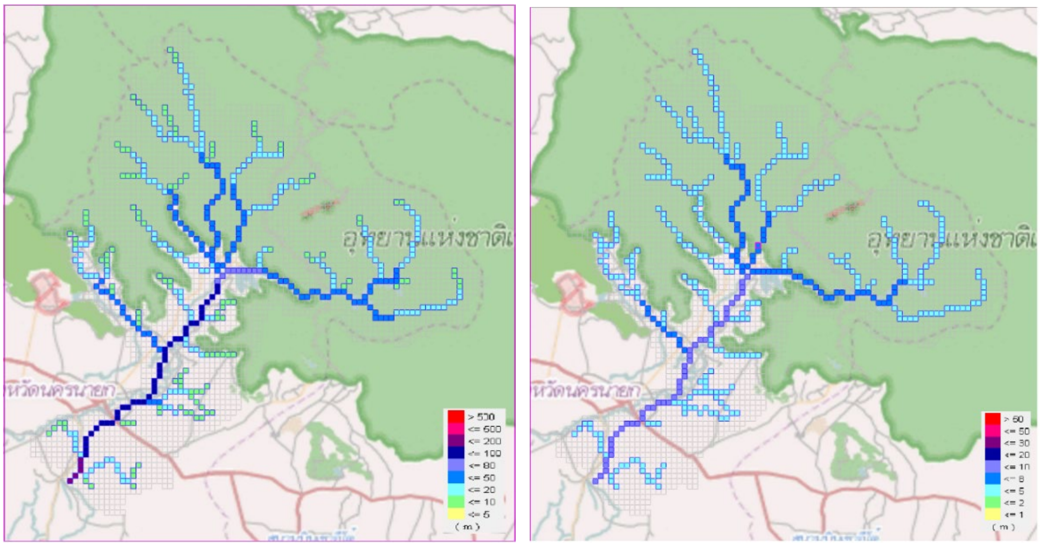


Figure 5 The width and depth of the main river in Wang tra Krai study area.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การปรับเทียบและการสอบเทียบแบบจำลอง

การศึกษาจำลองการไหลของน้ำจำเป็นต้องมีการสอบเทียบและทวนสอบแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัดจริง โดยใช้ข้อมูลสถานีวัดน้ำท่าในแม่น้ำนครนายกจำนวน 2 สถานี ได้แก่ NY1B และ NY4 โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำปีค.ศ. 2015 ในการสอบเทียบ (Calibration) โดยใช้ Manning n ที่ 0.030 จะได้ค่า R2 ของสถานี NY1B เท่ากับ 0.750 และค่า R2 สถานี NY4 เท่ากับ 0.507 ตามลำดับ โดยมีข้อมูลปริมาณปีค.ศ. 2018 ในการทวนสอบ (Validation) มีค่า R2 ของสถานี NY1B เท่ากับ 0.719 และค่า R2 สถานี NY4 เท่ากับ 0.707 ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 6 และ Figure 7

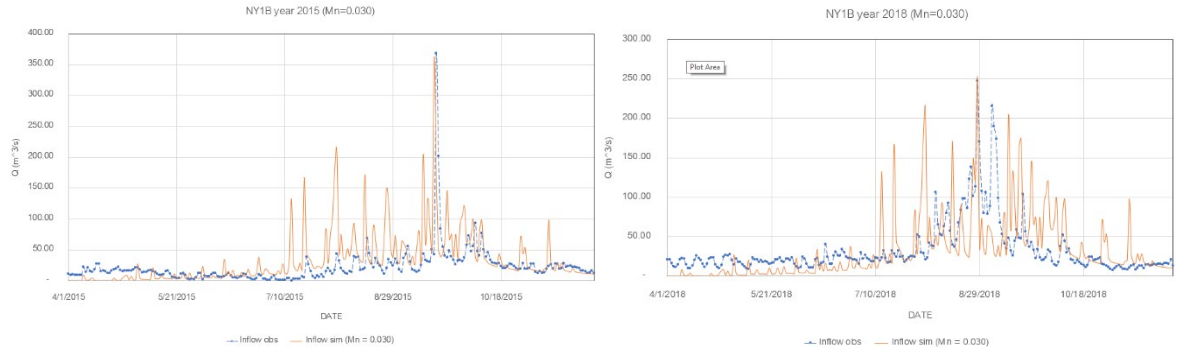


Figure 6 River discharge between observeatione and RRI simulation at NY1B (year 2015 and 2018).

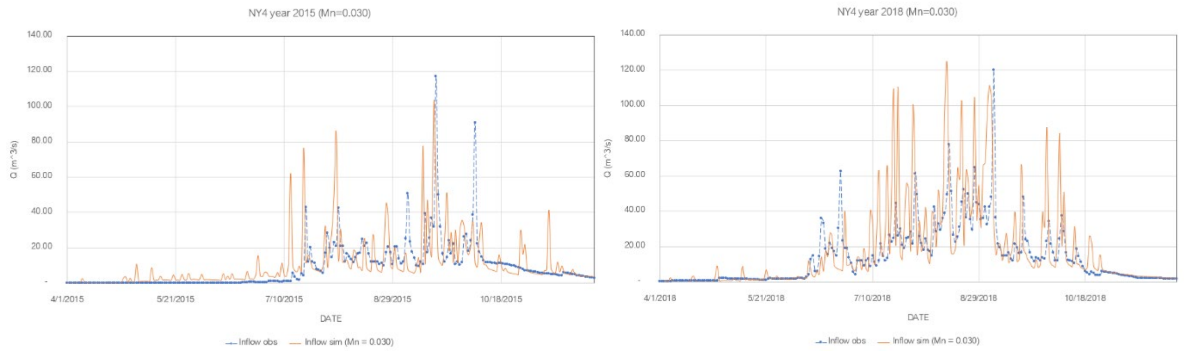


Figure 7 River discharge between observeatione and RRI simulation at NY4 (year 2015 and 2018).

จากการศึกษาผลของการพยากรณ์น้ำท่าและน้ำท่วมโดยแบบจำลอง Rainfall – Runoff – Inundation (RRI) แสดงผลน้ำหลาก ณ สถานี NY1B วันที่ 28 สิงหาคม ค.ศ.2019 พบว่ามีค่าอัตราการไหลของน้ำสูงสุด อยู่ที่ 251.83 ลบ.ม./วินาที (ค่าตรวจวัดได้ 248.00 ลบ.ม./วินาที) และมีค่าความสูงของน้ำสูงสุดอยู่ที่ 2.32 เมตร (ค่าตรวจวัดได้ 2.15 เมตร) จากอัตราการไหลของน้ำสูงสุดจากแบบจำลอง ทำให้ทราบว่าวันเวลาที่ทำให้เกิดน้ำหลาก และสามารถนำไปเตือนภัยเฝ้าระวังน้ำท่วมในพื้นที่ศึกษาได้

สรุป

จากขั้นตอนศึกษาที่ได้ผ่านกระบวนการศึกษา วิเคราะห์ ตั้งแต่การรวบรวมข้อมูล ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การจำลองแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า-น้ำหลากมีจุดเด่นในการที่ตัวแบบจำลองสามารถจำลองสภาพน้ำท่าและน้ำหลากไปพร้อมกัน ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลในการสร้างแผนที่น้ำท่วม หรือแผนที่ความเสี่ยงการเกิดน้ำท่วมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมชลประทาน ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลทางอุทกวิทยาที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาทรัพยากรน้ำที่คอยสนับสนุนแนะนำในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ธีรวัฒน์ รามอินทรา. 2015. **ฝนออกแบบเชิงพื้นที่สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าในลุ่มน้ำยม**. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บริษัท แอสดีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด. 2012. **การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง ลุ่มน้ำบางปะกง.** กรุงเทพ.

สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน. 2018. **รายงานแผนหลักการพัฒนาลุ่มน้ำ จังหวัดนครนายก.** กรุงเทพ.

Nastiti, K.D., Y. Kima, K. Jung and H. An. 2015. The application of Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model for inundation case in upper Citarum Watershed, West Java-Indonesia. **Procedia Engineering** 125: 166–172

Sayama, T. 2012. **Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin Research Institute (DPRI)**. Kyoto University.

Sayama, T. 2017. **Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model.** International Center for Water Hazard and Risk Management (ICHARM) Public Works Research Institute (PWRI) Disaster Prevention.

การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง จังหวัดอุดรธานี

A study of Land use Change Impacts on Runoff Discharge in Huay Luang Reservoir, Udon Thani

พิสินี ปฏิพัทธ์ปถวี[1*] และ วรรณดี ไทยสยาม[2]

Pisinee Patipatpatawee[1*] and Wandee Thaisiam [2]

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่อ่างเก็บน้ำห้วยหลวงในช่วง 10 ปีที่ผ่านมานั้น เกิดจากจำนวนประชากรมีจำนวนเพิ่มขึ้นจึงทำมีการขยายที่อยู่อาศัยเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันพื้นที่ป่าไม้ลดลงจากการทำเกษตรกรรม ทำให้มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีต่อปริมาณน้ำท่าของอ่างเก็บน้ำโดยใช้แบบจำลองSWAT ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินในสภาพปัจจุบัน (พ.ศ.2558) และในอนาคต 20 ปีข้างหน้า (พ.ศ.2578) โดยการปรับลดพื้นที่ป่าไม้เดิมให้เป็นที่อยู่อาศัยและพื้นที่เกษตรกรรม ผลการศึกษาพบว่าในปีน้ำมากปริมาณน้ำท่ารายเดือนที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำในการใช้ประโยชน์ที่ดิน 20 ปีข้างหน้ามีค่าสูงสุด 133.47 ล้าน ลบ.ม.ในเดือนกันยายน ซึ่งมีค่ามากกว่าสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินในปัจจุบันซึ่งมีค่า 112.47 ล้าน ลบ.ม. ในกรณีปีน้ำแล้งพบว่าปริมาณน้ำท่าในช่วงฤดูแล้งของสภาพการใช้ที่ดินในปัจจุบันมีค่ามากกว่าในอนาคต 20 ปี ส่วนในฤดูฝนน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำในการใช้ประโยชน์ที่ดิน 20 ปีข้างหน้ามีค่าสูงสุด 17.19 ล้าน ลบ.ม จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นรับน้ำเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ และผลการศึกษานี้จึงสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการบริหารจัดการน้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงได้

ABSTRACT

The land use in area of Huay Luang reservoir was change in past ten years due to increased population growth rate. It caused land use change from forest area to agriculture areas and residential areas. By the effect of lade use change, it affected to runoff of the reservoir. This study aims to simulate runoff of Huay Luang reservoir in present land use map (2558) and predicted land use map (2578) using hydrological model (SWAT). From study result, it shows that the maximum runoff of the predicted land use change map was 133.47 MCM in September of flood year. The maximum runoff of the present land use map was 112.47 MCM (drought year), the monthly runoff of dry season (November-April) of the present land use map was greater than the predicted land use change map. Whereas the maximum monthly runoff discharge of the predicted of land use change map was 17.19 MCM which was greater than the present of land use map. Accordingly, the land use change in area reservoir affected to monthly runoff.

Key words: land use changes, runoff discharge, SWAT model, Huay Luang reservoir

* Corresponding author; email address: Pisinee512@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ลุ่มน้ำห้วยหลวงเป็นลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำโขง โดยมีพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมและมีบางส่วนเป็นพื้นที่ป่าไม้ มีแหล่งเก็บน้ำขนาดใหญ่ คือ อ่างเก็บน้ำห้วยหลวงซึ่งเป็นแหล่งน้ำต้นทุนของ จังหวัดอุดรธานี มีพื้นที่รับน้ำประมาณ 600 ตร.กม. มีความจุที่ระดับเก็บกักปกติ 135 ล้าน ลบ.ม. คิดเป็นร้อยละ 75 ของความต้องการใช้น้ำทั้งหมดของจังหวัดอุดรธานี การบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง ช่วงฤดูน้ำหลาก กรมชลประทานได้มีการประเมินปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำก่อนเข้าฤดูน้ำหลากและได้วางแผนบริหารจัดการน้ำในช่วงฤดูน้ำแล้งถัดไปจากปริมาณน้ำที่เก็บกักอยู่ในอ่างเก็บน้ำ ณ วันที่ 1 พฤศจิกายน ของทุกปี การคาดการณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในช่วงฤดูฝนนั้นมีปัจจัยในการคาดการณ์หลายประการ เช่น ปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่รับน้ำของอ่างเก็บน้ำ การใช้ประโยชน์ที่ดินรวมถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในปี พ.ศ.2554 ในพื้นที่รับน้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงมีฝนตกเร็วกว่าปกติและมีปริมาณน้ำฝนมากกว่าปกติเนื่องจากปรากฏการณ์ลานีญาซึ่งส่งผลกระทบต่ออ่างเก็บน้ำห้วยหลวง ทำให้มีปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสูงเกินกว่า 100 ล้าน ลบ.ม. และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงระดับเก็บกัก จึงต้องมีการเร่งระบายน้ำออก ส่งผลให้น้ำเอ่อล้นตลิ่ง ไหลเข้าท่วมถนน บ้านเรือน และพื้นที่นาข้าว และพื้นที่การเกษตรของชาวบ้าน เป็นบริเวณกว้างตลอดสองฝั่งลำน้ำห้วยหลวง ในขณะที่ปี พ.ศ.2558 ประสบปัญหาภัยแล้งมีปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยต่ำกว่า 50 ล้าน ลบ.ม (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2560) ส่งผลให้การบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ประสบปัญหาไม่สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่รับน้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงได้เปลี่ยนแปลงไปจากอดีต ทำให้มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงด้วยเช่นกัน

การหาปริมาณน้ำท่าให้มีประสิทธิภาพช่วยให้สามารถวางแผนการใช้น้ำในปีต่อไปได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการประเมินปริมาณน้ำท่าในปัจจุบันมีการนำแบบจำลองทางอุทกวิทยาเข้ามาช่วยเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างสะดวกขึ้นและการประเมินปริมาณน้ำท่าให้ค่าที่มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น (โอฬาร, 2548) ได้ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของการใช้ที่ดินต่อน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำน่านตอนบน โดยใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อค่าปริมาณน้ำท่ารายเดือนของลุ่มน้ำน่านตอนบน ผลการศึกษาพบว่าโครงข่ายลำน้ำที่จำลองขึ้นด้วยแบบจำลอง SWAT มีสภาพใกล้เคียงกับลำน้ำจริง และปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าตรวจวัดในขนาดที่ยอมรับได้ ต่อมา (ปิยะวัฒน์ และเจริญ, 2556) ได้ทำการศึกษาปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำโดยใช้แบบจำลอง SWAT ในลุ่มน้ำแม่แจ่ม มีวัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์ค่าตัวแปรของแบบจำลอง SWAT ที่เหมาะสมสำหรับลุ่มน้ำแม่แจ่ม และทำการประเมินการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่าภายใต้สภาพการเปลี่ยนสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน จากการปรับลดพื้นที่ป่าเดิมให้เป็นพื้นที่เกษตรกรรม ผลการจำลองพบว่าปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ป่าไม้ถูกลดเป็นพื้นที่เกษตรกรรม และต่อมา (ภัทราพร และปรียาพร, 2557) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำลำพระเพลิงตอนบน ที่เกิดจากปริมาณน้ำฝนในรอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ จากผลการศึกษาได้ผลการประเมินปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีค่าเกินความจุของอ่างเก็บน้ำ ดังนั้น ควรมีแผนการบริหารจัดการปริมาณน้ำส่วนที่เกินความจุเก็บ จากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าแบบจำลอง SWAT สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแบบจำลอง SWAT สามารถจำลองสภาพทางอุทกวิทยาของพื้นที่รับ

น้ำได้อย่างดี และสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษาให้สอดคล้องสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีการเปลี่ยนแปลงได้

พื้นที่ศึกษา

ลุ่มน้ำห้วยหลวง เป็นลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำโขง อยู่ในลุ่มน้ำภาคตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่ 3,418 ตร.กม. คลอบคลุมพื้นที่ 3 จังหวัดคือ จังหวัดหนองคาย จังหวัดอุดรธานี และจังหวัดหนองบัวลำภู (Figure 1) พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมและมีบางส่วนเป็นพื้นที่ป่าไม้ ลำน้ำห้วยหลวงมีต้นกำเนิดจากแนวสันเขาระดับความสูงระหว่าง 200-450 ม.รทก. พื้นที่ระหว่างอำเภอเมือง จังหวัดหนองบัวลำภู กับอำเภอหนองวัวซอ จังหวัดอุดรธานี น้ำในลำน้ำห้วยหลวงจะไหลลงอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงโดยอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงมีพื้นที่รับน้ำประมาณ 600 ตร.กม. จากนั้นไหลผ่านที่ราบบริเวณอำเภอเมืองและอำเภอสร้างคอม จังหวัดอุดรธานี แล้วไหลลงสู่แม่น้ำโขงที่อำเภอโพนพิสัย จังหวัดหนองคาย (Figure 2)

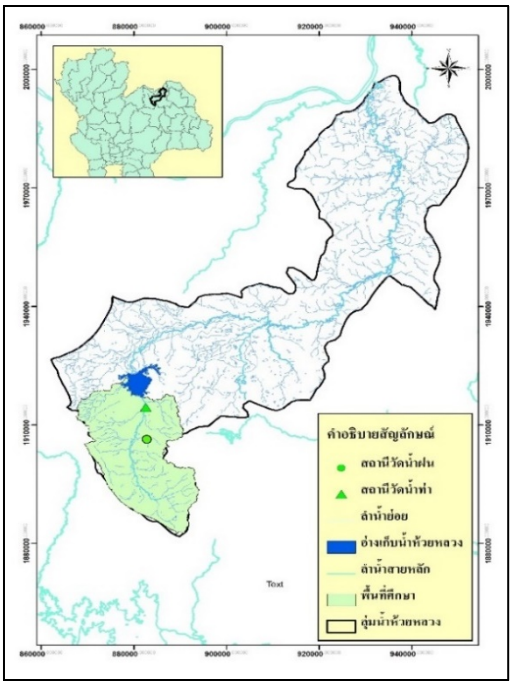


Figure 1 Study area.

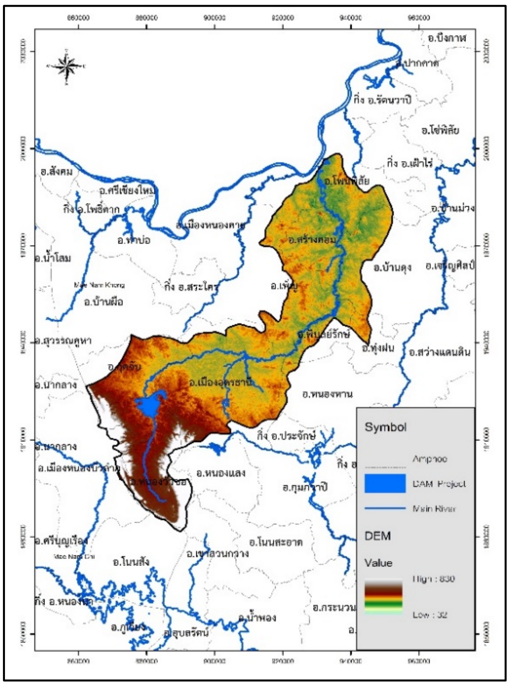


Figure 2 Topographical conditions of study area.

สภาพทางอุทกวิทยา

ลุ่มน้ำห้วยหลวงมีปริมาณฝนเฉลี่ยสูงสุดจากสถานีวัดน้ำฝนที่มีผลต่ออ่างเก็บน้ำทั้งหมด 1 สถานี คือ สถานี PCPNVS (รหัสสถานี 354009) ที่อำเภอหนองวัวซอ ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งปริมาณน้ำฝน เฉลี่ยสะสมสูงสุดในช่วงเดือน สิงหาคม ถึงกันยายน เฉลี่ยระหว่าง 256.5–231.6 มม. และปริมาณฝนเฉลี่ยสะสมต่ำสุดในช่วงเดือน ธันวาคม – มกราคม เฉลี่ยระหว่าง 5.3-6.7 มม. และมีปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยที่สถานีวัดน้ำท่า Kh.53 (บริเวณเหนืออ่างเก็บน้ำใน Figure 1) อำเภอหนองวัวซอ เท่ากับ 163 ล้าน ลบ.ม. ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีไหลลงอ่างมากที่สุด ประมาณ 227.60 ล้าน ลบ.ม. และปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีไหลลงอ่างต่ำสุด ประมาณ 14.90

ล้าน ลบ.ม. ปริมาณน้ำท่ารายปีสูงสุดปี 2554 มีปริมาณน้ำ 176.61 ล้าน ลบ.ม. และปริมาณน้ำท่ารายปีต่ำสุดในปี 2558 มีปริมาณน้ำ 14.95 ล้าน ลบ.ม.

สภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณเหนืออ่างเก็บน้ำห้วยหลวง

จากข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. 2552 พบว่าลักษณะของการใช้ที่ดินที่มีสัดส่วนมากที่สุดคือพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นที่ โดยคิดเป็นร้อยละ 48 ของการใช้ที่ดินทั้งหมด รองลงมาเป็นพื้นที่ป่าไม้กระจายตัวอยู่ทั่วพื้นที่เช่นเดียวกันคิดเป็นร้อยละ 41 และพื้นที่อยู่อาศัยคิดเป็นร้อยละ 4 พื้นที่น้ำคิดเป็นร้อยละ 3 ส่วนที่เหลือเป็นพื้นที่อื่น ๆ อีกร้อยละ 3 และ ปี พ.ศ. 2558 พบว่าลักษณะของการใช้ที่ดินมีสัดส่วนมากสุดคือพื้นที่เกษตรกรรมคิดเป็นร้อยละ 50 ของการใช้ที่ดินทั้งหมด รองลงมาเป็นพื้นที่ป่าไม้คิดเป็นร้อยละ 38 และพื้นชุมชนและสิ่งปลูกสร้างคิดเป็นร้อยละ 5 พื้นที่น้ำคิดเป็นร้อยละ 4 ส่วนที่เหลือเป็นพื้นที่อื่น ๆ อีกร้อยละ 3 แสดงใน Figure 3 และ Table 1

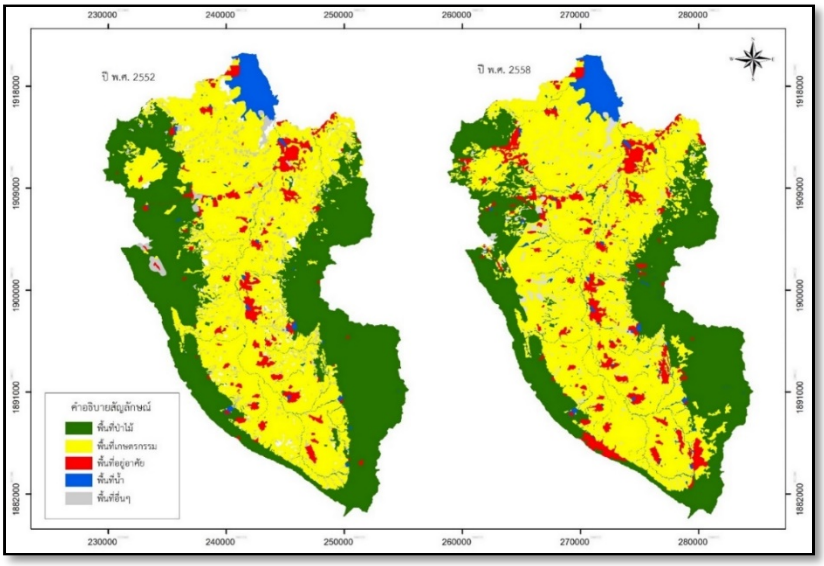


Figure 3 land use map of Huay Luang basin in 2552 and 2558.

Table 1 Land use details of Huay Luang basin.

Landuse Type	2552		2558	
	Area (Rai)	%	Area (Rai)	%
Agricultural land	179,433.00	48	187,860.00	50
Forest land	154,136.00	41	141,916.00	38
Urban and Built-up land	15,923.00	4	18,174.00	5
Water	12,965.00	3	15,914.00	4
Miscellaneous area	12,310.00	3	10,904.00	3
Total	374,768.23	100	374,768.22	100

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ประเมินน้ำท่าโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ SWAT Model (Soil and Water Assessment Tool) แบบจำลอง SWAT เป็นแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่สามารถประเมินผลกระทบของสภาพการใช้ที่ดินต่อปริมาณน้ำท่า โดยการสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) ข้อมูลกายภาพของพื้นที่ศึกษา ได้แก่ข้อมูลชุดดิน ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2552 และ 2558 จากกรมพัฒนาที่ดิน และข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศหรือ Digital Elevation (DEM) ปี พ.ศ. 2554 จากกรมพัฒนาที่ดิน 2) ข้อมูลทางอุทกวิทยา ได้แก่ ข้อมูลฝนรายวัน จำนวน 3 สถานี จากกรมอุตุนิยมวิทยา ในช่วงปี พ.ศ. 2550 ถึง ปี พ.ศ. 2559 ข้อมูลสภาพภูมิอากาศของสถานีวัดอากาศของจังหวัดอุดรธานี และข้อมูลน้ำท่ารายเดือน จากสถานี Kh.53 ของกรมชลประทาน

1. จัดทำแบบจำลอง SWAT โดยนำเข้าข้อมูล DEM จำลองสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ พร้อมกับนำเข้าข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน และข้อมูลชุดดิน เพื่อวิเคราะห์สภาพทั่วไปของพื้นที่ ทั้งผิวดินและใต้ผิวดิน ส่วนข้อมูลด้านอุทกวิทยาจะนำข้อมูลฝน ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณน้ำท่า การวิเคราะห์ทางอุทกวิทยาของลุ่มน้ำด้วยแบบจำลอง SWAT สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก ประกอบด้วย 1) ส่วนพื้นดิน (Land phase) จะเป็นการศึกษาวงจรทางอุทกวิทยา เพื่อประเมินหาปริมาณน้ำท่า ที่ไหลสู่ลำน้ำหลักของแต่ละลุ่มน้ำย่อย 2) ส่วนการเคลื่อนที่ในลำน้ำ (Water routing phase) จะคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำ ซึ่งในบทความนี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนพื้นดิน เท่านั้น

หลักการคำนวณปริมาณน้ำท่าในแบบจำลอง

การศึกษาวงจรอุทกวิทยาในแบบจำลอง SWAT จะคำนวณจากสมการสมดุลน้ำ ดังนี้

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{i} (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

เมื่อ SW_t คือ ปริมาณน้ำในดินสุดท้าย

E_a คือ ปริมาณการคายระเหยในวันที่ i

SW_0 คือ ปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นในวันที่ i

W_{seep} คือ ปริมาณน้ำไหลซึมลงสู่ชั้นใต้ดินในวันที่ i

R_{day} คือ ปริมาณฝนในวันที่ i

Q_{gw} คือ ปริมาณน้ำใต้ดินที่ไหลกลับสู่ลำน้ำในวันที่ i

Q_{surf} คือ ปริมาณน้ำผิวดินในวันที่ i

2. การสอบเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ในการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง SWAT (Simulation) ต้องทำการสอบเทียบโดยใช้ข้อมูลน้ำฝน และน้ำท่าในช่วงปี พ.ศ. 2551-2555 (5 ปี) รวมถึงข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2552 โดยทำการปรับแก้ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ทางลักษณะกายภาพของลุ่มน้ำ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ค่าปริมาณการไหลพื้นฐานของน้ำผิวดิน (SOL_AWC, ESCO, CH_N2 และ CN2) และค่าปริมาณการไหลพื้นฐานของน้ำใต้ดิน (GW_DEIAY, ALPHA_BF และSLSUBBSN) ซึ่งจะใช้เป็นตัวชี้วัดในการประเมินจำนวน 2 ตัวแปร ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R2 (Coefficient of Determination) และค่า NSE (Nash - Sutcliffe Simulation Efficient) ได้แก่

- ค่าสัมประสิทธิ์การตัดใจ R2 (Coefficient of determination)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})^2}\ \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

- ค่า NES (Nash – Sutcliffe simulation efficiency)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O}_i)^2}$$

เมื่อ i คือ ลำดับที่ของข้อมูล n คือ จำนวนข้อมูล

O_i คือ ค่าจากการตรวจวัด $\bar{O}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัดทั้งหมด

P_i คือ ค่าจากแบบจำลอง $\bar{P}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลองทั้งหมด

จากนั้นจะตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Validation) โดยใช้ชุดตัวแปรที่ทำการปรับแก้ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์จากการสอบเทียบแบบจำลอง เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำจากแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. 2558 เทียบกับข้อมูลตรวจวัดปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง

3. การจำลองการเปลี่ยนแปลงของการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีผลต่อปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง จากการรวบรวมข้อมูลพื้นที่ศึกษาในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา พบว่าการใช้ที่ดินเพื่อการอยู่อาศัยนั้นเพิ่มขึ้นขยายเข้าไปในพื้นที่เกษตร ส่วนพื้นที่การเกษตรเพิ่มขึ้นขยายเข้าไปในพื้นที่ป่าไม้จึงทำให้พื้นที่ป่าไม้ลดลง โดยพื้นที่ป่าไม้ลดลง 8% พื้นที่เกษตรกรรมเพิ่มขึ้น 5% และ พื้นที่อยู่อาศัยเพิ่มขึ้น 12% รวมถึงมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินด้านอื่นๆ ดังนั้นการคาดการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินอนาคต 20 ปีข้างหน้า จึงใช้แนวโน้มและทิศทางขยายตัวของการใช้ที่ดินในปี 2552 ถึงปี 2558 ในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้ว่าพื้นที่ป่าจะลดลงจากปีฐานอีก 15% ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นพื้นที่ป่าไม้ 32.19% พื้นที่เกษตรกรรม 53.91% พื้นที่อยู่อาศัย 6.74% และพื้นที่อื่นๆ 7.16% ของพื้นที่ทั้งหมด

ผลการศึกษา

ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Calibration and Validation)

การสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration) ได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ผลลัพธ์ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าตรวจวัดโดยทำการปรับแก้ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ทางลักษณะกายภาพของลุ่มน้ำจำนวน 8 ค่า แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ค่าปริมาณการไหลพื้นฐานของน้ำผิวดิน (SOL_AWC, ESCO, HRU_SLP, CH_N2 และCN2) และค่าปริมาณการไหลพื้นฐานของน้ำใต้ดิน (GW_DELAY, ALPHA_BF และ SLSUBBSN) ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแสดงไว้ใน Table 2 ค่าที่มีความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ในแบบจำลองที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่ามากที่สุดคือค่า CN2 (ค่าสัมประสิทธิ์ในลำน้ำที่ความชื้นในดินระดับที่ 2) ในการสอบเทียบได้ค่าพารามิเตอร์ CN2 ของพื้นที่ป่าไม้อยู่ที่ 77 พื้นที่เกษตรกรรมอยู่ที่ 81 และพื้นที่อยู่อาศัยอยู่ที่ 89 ซึ่งมีความสอดคล้องกับสภาพลักษณะพื้นที่ลุ่มน้ำมีความใกล้เคียงกับการผลการศึกษาที่ผ่านมา (Arnold *et al.*, 2538) จึง

ทำให้ปริมาณน้ำที่ไหลจากแบบจำลองมีความสัมพันธ์กับปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยการสอบเทียบได้ใช้ข้อมูลแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. 2552 เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำห้วยหลวงในช่วง ปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2555 เทียบกับปริมาณน้ำท่าตรวจวัดของสถานี Kh.53 ดังแสดงใน Figure 4 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง SWAT สามารถประเมินปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีได้ใกล้เคียงกับปริมาณน้ำท่าตรวจวัด โดยมีค่า R2 เท่ากับ 0.87 และค่าNES เท่ากับ 0.81 โดยปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีที่ได้จากแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 408.99 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณน้ำท่าตรวจวัดที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงเฉลี่ยรายปี เท่ากับ 395.90 ล้าน ลบ.ม.

การตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Validation) ได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนการปรับเทียบแบบจำลองมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ.2558 เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำเทียบกับข้อมูลตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่า Kh.53 ดังแสดง Figure 5 จากผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง พบว่ามีค่า R2 เท่ากับ 0.98 และค่า NSE เท่ากับ 0.96 ค่าปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลอง (Simulation) เท่ากับ 2.03 ล้านลบ.ม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่าที่สถานี Kh.53 มีเท่ากับ 1.76 ล้านลบ.ม.ซึ่งผลของการตรวจพิสูจน์แบบจำลองจะเห็นได้ว่า แบบจำลอง SWAT สามารถจำลองปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำห้วยหลวงได้เป็นอย่างดี

Table 2 Parameters modified in SWAT.

No.	Parameter	Definition	Range	Proposed value
1	SOL_AWC	Available water capacity in soil	0-1	0.290
2	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0-1	0.500
3	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	0-1	0.000
4	SLSUBBSN	Average slope length (m)	10-150	110.000
5	GW_DELAY	The groundwater delay (days)	0-500	22.000
6	HRU_SLP	Average slope steepness (m/m)	0-0.6	0.050
7	CH_N2	Manning's "n" value for the main channel	0-0.3	0.014
8	CN2	Runoff Cruve Number	35-98	66.00-89.00

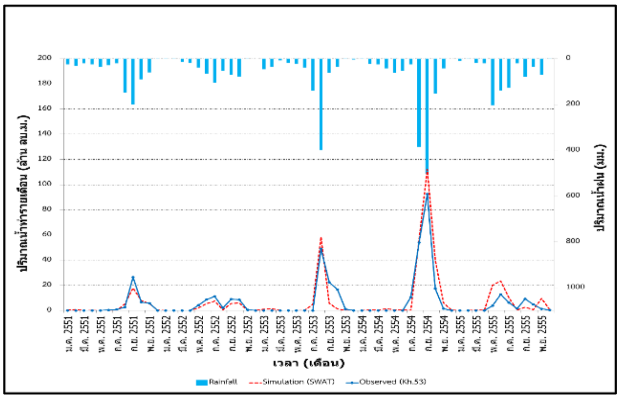


Figure 4 Model calibration (Land use map, 2552).

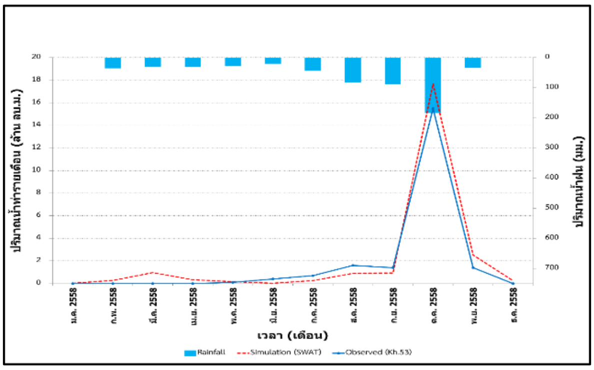


Figure 5 Model validation (Land use map, 2558).

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง

ในการศึกษาได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำห้วยหลวงใน 2 กรณี โดยกรณีที่ 1 วิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าในสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินปัจจุบัน (พ.ศ.2558) โดยใช้ข้อมูลฝน 10 ปี (พ.ศ.2550 - พ.ศ. 2559) ส่วนกรณีที่ 2 วิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าในสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต 20 ปีข้างหน้า โดยใช้การเปลี่ยนแปลงประโยชน์ที่ดินปัจจุบันดังแสดงใน Table 3

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าในกรณีที่ 1 พบว่าปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยในสภาพการใช้ที่ดินปัจจุบันในช่วงฤดูฝนมีค่าเท่ากับ 72.26 ล้าน ลบ.ม. และช่วงฤดูแล้ง 6.61 ล้าน ลบ.ม. ดังแสดงใน Figure 6 เมื่อเทียบกับข้อมูลน้ำท่าตรวจวัด พบว่าในปีน้ำหลาก (พ.ศ. 2554) ปริมาณน้ำท่าในช่วงฤดูฝนเท่ากับ 183.50 ล้าน ลบ.ม. ดังแสดงใน Figure 6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 175.10 ล้าน ลบ.ม. และในช่วงฤดูแล้งมีปริมาณน้ำเท่ากับ 3.26 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดน้ำท่าเท่ากับ 1.50 ล้าน ลบ.ม. และในปีน้ำแล้ง (พ.ศ. 2558) ในช่วงฤดูฝนมีปริมาณน้ำท่าเท่ากับ 15.54 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดมีเท่ากับ 14.00 ล้าน ลบ.ม. และในช่วงฤดูแล้งมีปริมาณน้ำเท่ากับ 1.61 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดน้ำท่าเท่ากับ 1.00 ล้าน ลบ.ม. ดังแสดงใน Figure 6

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าในกรณีที่ 2 การเปลี่ยนสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินจากการปรับลดพื้นที่ป่าไม้ร้อยละ 15 เพื่อเป็นพื้นที่เกษตรกรรม 10% และเป็นพื้นที่อยู่อาศัย 5% ซึ่งทำให้มีพื้นที่เกษตรกรรม 54 % พื้นที่ป่าไม้ 32 % พื้นที่อยู่อาศัย 7% พื้นที่น้ำ 4% และพื้นที่อื่นๆ 3% ดังแสดงใน Table 3 พบว่าในปีน้ำหลาก (พ.ศ. 2554) ปริมาณน้ำท่าช่วงฤดูฝนเท่ากับ 261.55 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งมากกว่าข้อมูลตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 86.45 ล้าน ลบ.ม. ส่วนในช่วงฤดูแล้งมีปริมาณน้ำท่าเท่ากับ 7.93 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าข้อมูลตรวจวัดเท่ากับ 6.43 ล้าน ลบ.ม. ดังแสดงใน Figure 6 และในปีน้ำแล้ง (พ.ศ. 2558) มีปริมาณน้ำท่าในช่วงฤดูฝนเท่ากับ 22.64 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าข้อมูลตรวจวัดเท่ากับ 8.64 ล้าน ลบ.ม. ส่วนในช่วงฤดูแล้งมีปริมาณน้ำท่าเท่ากับ 4.00 ล้าน ลบ.ม.ซึ่งมีค่ามากกว่าข้อมูลตรวจวัดเท่ากับ 3.00 ล้าน ลบ.ม. ดังแสดงใน Figure 6

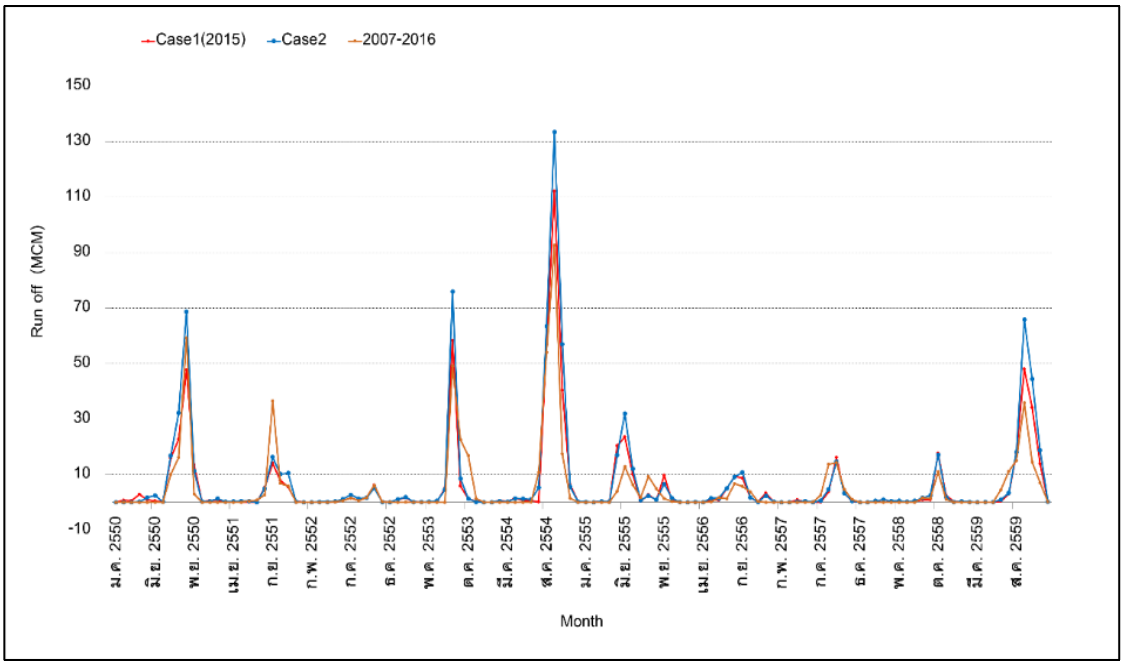


Figure 6 Monthly runoff comparison between in case study 1 and case study 2.

Table 3 Land use in case study.

Landuse Type	Case study 1 (2558)		Case study 2 (2578)	
	Area (Rai)	%	Area (Rai)	%
Agricultural land	187,860.00	50	202,052.00	54
Forest land	141,916.00	38	120,629.00	32
Urban and Built-up land	18,174.00	5	25,269.00	7
Water	15,914.00	4	15,914.00	4
Miscellaneous area	10,904.00	3	10,904.00	3
Total	374,768.00	100	374,768.00	100

สรุป

จากผลการจำลองสภาพการใช้ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงไปในอนาคตอีก 20 ปีข้างหน้าที่มีต่อปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง สามารถสรุปได้ว่าในช่วงปีน้ำหลาก (พ.ศ. 2554) ช่วงฤดูฝนมีปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างมากมากกว่าสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินปัจจุบัน ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยและเมื่อเข้าสู่ฤดูแล้ง ปริมาณน้ำท่าเริ่มลดลงตั้งแต่เดือนตุลาคมจนถึงเดือนมีนาคม ทำให้เสี่ยงต่อการเกิดภัยแล้งดังแสดงใน Figure 6 และจากผลการวิเคราะห์ช่วงปีน้ำแล้ง (พ.ศ. 2558) มีปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำห้วยหลวงเพียงเล็กน้อย ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนตุลาคม และปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำน้อยลงตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนจนถึงเดือนเมษายนจึงทำให้พื้นที่ศึกษาเสี่ยงต่อโอกาสเกิดภัยแล้ง ดังแสดงใน Figure 6

งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของการใช้ประโยชน์ที่ดินส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงอย่างมาก ดังนั้นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจึงมีความสำคัญและมีประโยชน์ต่อการวางแผนการบริหารจัดน้ำ การวางแผนเพาะปลูกพืช ในพื้นที่อ่างเก็บน้ำห้วยหลวงในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

ปิยะวัฒน์ วุฒิชัยกิจเจริญ. 2559. การศึกษาการจำลองปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวง โดยใช้แบบจำลอง SWAT. **วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า** 14.

ปิยะวัฒน์ วุฒิชัยกิจเจริญ และ เจริญ สารตัน. 2556. การประเมินน้ำท่าในลุ่มแม่แจ่ม โดยใช้แบบจำลอง SWAT. *ใน* **เอกสารประชุมวิชาการวิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งชาติ ครั้งที่** 5.

ภรัณยู มะลิพรม. 2557. การประเมินปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำปิงตอนบนจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยแบบจำลอง SWAT. *ใน* **งานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่** 19 วันที่ 14-16 พฤษภาคม 2557 ณ โรงแรมราชาออคิดขอนแก่น.

ภัทราพร แสงทอง และ ปรียาพร โกษา. 2557. การประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT. กรณีศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำลำพระเพลิงตอนบน. **วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ** 5(2).

โอฬาร เวชอุไร. 2548. **ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำน่านตอนบนโดยใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยา SWAT.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ,คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การประเมินความเสี่ยงในงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริม งานก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดขุดหล่อในชั้นดิน กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน

Risk Assessment Lifting and Installation steel structure in Diaphragm Walls Construction Case Study of Metro Subway Construction Project

ณัฐดนัย ใจคุ้มเก่า[1*] และ พิพัฒน์ สอนวงษ์[1*]

Natdanai Jaikumkao[1*] and Piphat Sornwong[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ประเมินความเสี่ยงในงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริม งานก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดขุดหล่อในชั้นดิน กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน การวิเคราะห์ประเมินความเสี่ยงเพื่อหาโอกาสที่อาจจะเกิดอุบัติเหตุด้วย การวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบแผนภูมิต้นไม้ ซึ่งสาเหตุที่สำคัญมาจากการปฏิบัติงานที่ผิดพลาด ความเครียด อ่านค่าผิด เร่งรีบทำงานเกินไป และอุปกรณ์เกี่ยวกับงานยกชำรุดบกพร่องขณะปฏิบัติงานงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริม ผลการศึกษาหาความเสี่ยงพบว่า โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุจากงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริมมีโอกาสเกิดอุบัติเหตุสูง จากการศึกษาได้แสดงให้ทราบถึงค่าความเชื่อมั่น และค่าโอกาสการเกิดอุบัติเหตุ จากการเก็บสถิติอุบัติเหตุก่อนเริ่มจัดทำแผนบริหารลดความเสี่ยงมีจำนวน 12 ครั้งหลังจากการวางแผนบริหารลดความเสี่ยงของอุบัติเหตุต่อผู้ปฏิบัติงานร่วมกับเครนและอุปกรณ์ต่าง ๆ งานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริมงานก่อร้างกำแพงกันดินแบบขุดหล่อในชั้นดินในการยกจะเห็นได้ว่าในระยะเวลาเท่ากันอุบัติเหตุลดลงจำนวน 6 ครั้ง คิดเป็น 50 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

This study assessed the risk of lifting and installation of reinforced steel frame in diaphragm walls construction in subsoils: a case study of the subway station construction project Fault Tree Analysis (FTA) chance of accident by the main cause was incorrect operation, stress, misreading, hurry to work and the defect of lifting equipment while lifting and installing the reinforced steel frame. Therefore, the finding indicated that the chance of accident from lifting and installation of reinforced steel frame was high. This study also showed the confidence and the chance of accidents. From accident statistics collection, there were 12 accidents before starting to create a risk management plan while after the risk management planning towards operators and crane and equipments, the number of accidents from lifting and installation of reinforced steel frame in diaphragm walls construction in subsoils decreased 6 accidents or 50 percent.

Key words: Risk Assessment, Fault Tree Analysis, Construction Workers

*Corresponding author; e-mail address: natdanai.jai@ku.th, fengpps@ku.ac.th

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การทำกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อคอนกรีตกับที่เป็นงานที่ต้องใช้พื้นที่ในการก่อสร้างเพื่อรองรับเครื่องจักรรวมไปถึงชิ้นส่วนโครงสร้างอุปกรณ์ขนาดใหญ่เพื่อใช้งานการก่อสร้าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความปลอดภัยในการก่อสร้างเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องมีการชี้บ่งอันตราย และการประเมินความเสี่ยง เพื่อให้ครอบคลุมความปลอดภัย และจะต้องดำเนินการอย่างเป็นระบบและต่อเนื่อง เพื่อให้สอดคล้องกับงานด้านความปลอดภัยและความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นเพื่อลดความเสียหายที่เกิดจากอันตรายในขั้นตอนก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อคอนกรีตกับที่ ดังนั้นการศึกษาการชี้บ่งอันตราย และการประเมินความเสี่ยงงานก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อกับที่ นั้นจึงเป็นข้อมูลหนึ่งซึ่งจะสามารถนำไปประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างและยังเป็นสถิติข้อมูลพื้นฐานทางด้านความปลอดภัย อีกทั้งยังสามารถนำผลที่ได้ไปจัดทำแผนการทำงานให้มีความปลอดภัยได้อีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการทำการศึกษา

ศึกษาข้อมูล งานวิจัย ข้อกำหนด มาตรฐาน และกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการทำงาน วิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริมงานก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อในชั้นดิน ทำการรวบรวมจำนวนการเกิดอุบัติเหตุและอุบัติการณ์ที่เกิดขึ้น วิเคราะห์ปัจจัยที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุด้วยวิธี Fault Tree Analysis จัดทำแผนลดอุบัติเหตุ และสรุปผลการศึกษาและจัดทำรูปเล่มรายงาน

ผลและวิจารณ์

สถิติอุบัติเหตุในการทำงานจะพบว่าอุบัติหตุที่เกิดจากการพนักงานทำงานร่วมกับเครื่องจักรชนิดปั่นจั่นเคลื่อนที่ (12) เหตุการณ์ในจำนวน (53) เหตุการณ์ อุบัติเหตุที่ทรัพย์เสียหายและพนักงานบาดเจ็บในงานนั้นมาจากการทำงานร่วมกับเครื่องจักรชนิดเครน

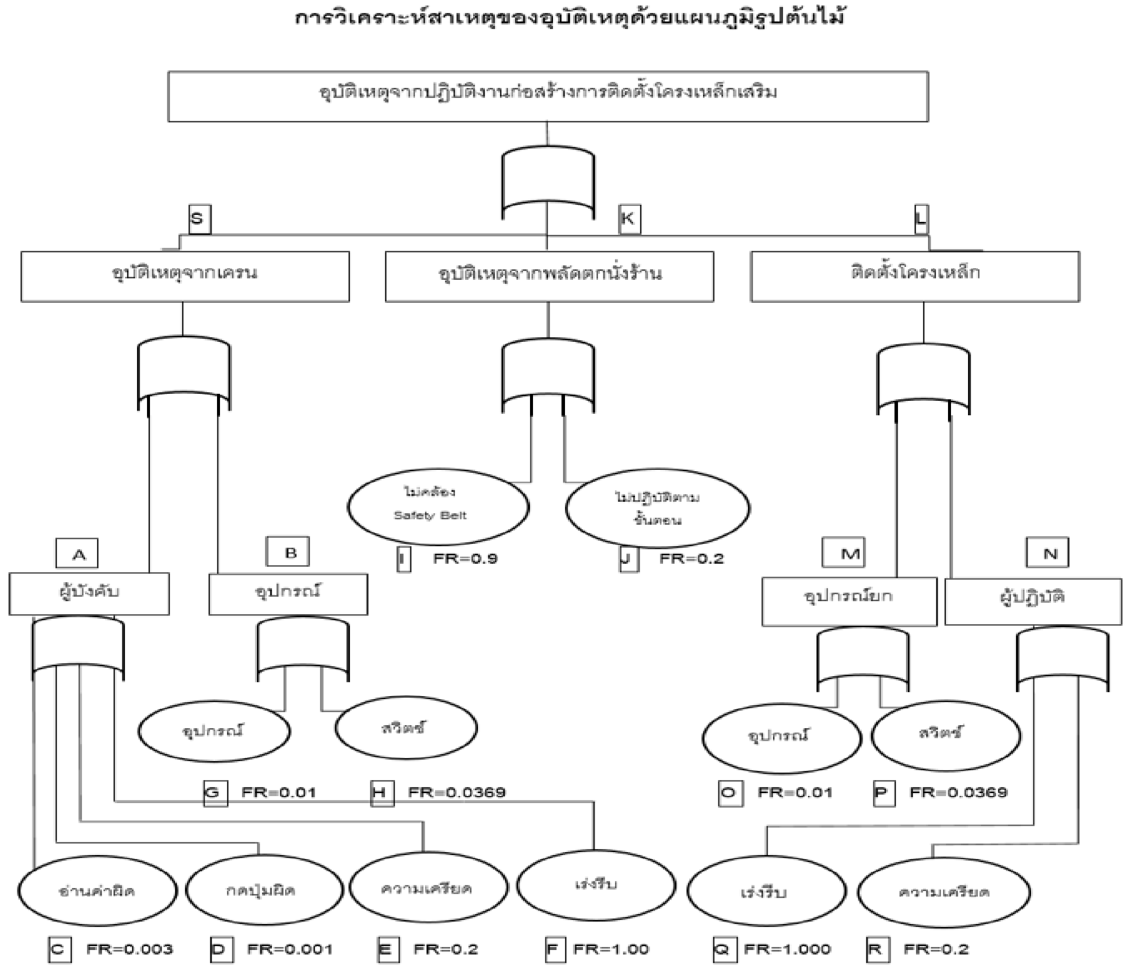


Figure 1 Writing the relationships of the causes that cause accidents from installing steel reinforcement with the tree method.

Table 1 Annual damage rate of devices failure rate (FR).

Instrument	Failures / yr	Instrument	Failures / yr
Human error	Failures / yr	Electrical hardware	Failure/yr
Selection of key-operate switch	10^{-4}	Motor failure	0.0086
Selection of hand switch	10^{-3}	Transformer, open/shorts	0.0086
Reading of labels	$3x10^{-3}$	Relays, failure to energize	0.011
Correct action under stress	0.2	Circuit breakers, failure to transfer	0.36
Correct action under stress in 60 sec	1.0	Limit switch failure	0.036
Correct action under stress in 5 min	0.9	Torque switches, failure to operate	0.036

ที่มา: Louvar (1998).

สาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุจากเครนที่มาจากผู้บังคับเครนนั้นเกิดจากเหตุการณ์พื้นฐาน (Basic Event) เหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งหรือทุกเหตุการณ์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่แท้จริง คือ ผู้บังคับเครน อ่านค่าจากตารางบอกน้ำหนัก (Lode Chart) ผิดพลาดผู้บังคับกดปุ่มบังคับด้วยมือผิดพลาดผู้บังคับทำงานรีบเร่ง หรือมีความเครียดขณะทำงาน

Table 2 Failure probability, reliability and average useful life before failure of the cranes.

Events	Failure rate/year (μ)	Reliability ($R = e^{-\mu t}$)	Failure Probability F = 1-R
C	0.003	0.997	0.003
D	0.001	0.999	0.001
E	0.200	0.818	0.182
F	1.000	0.368	0.632

Table 3 Failure probability and reliability of accident from falling from scaffolding.

Events	Failure rate/year (μ)	Reliability ($R = e^{-\mu t}$)	Failure Probability F = 1-R	Average useful life (μ) of failure MTBF $=\frac{1}{\mu}$ year
I	0.9	0.406	0.594	0.9
J	0.2	0.818	0.182	0.2

Table 4 Failure probability and reliability of steel structure installers.

Events	Failure rate/year (μ)	Reliabilityn($R = e^{-\mu t}$)	Failure Probability F = 1-R
Q	1.0	0.368	0.632
R	0.2	0.818	0.182

จากตารางที่ 4 แสดงสมการทางคณิตศาสตร์หาโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุและความน่าเชื่อถือเหตุการณ์ L (Fault Event) ของอุบัติเหตุจากการติดตั้งโครงเหล็กเสริม ดังนี้ค่าความเชื่อมั่น (Reliability) จากสมการของเหตุการณ์

Table 5 Summary of the analysis, reliability and accident probability from.

1.crane 2. Installing steel structures 3. Fall from scaffolding

Accident	Accident probability	Reliability
1. Crane	0.701	0.299
2. Installing steel structures	0.699	0.301
3. Fall from scaffolding	0.668	0.332

ระดับความเชื่อมั่น และโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุ ข้อมูลทางสถิติจัดไว้ 5 ระดับ ตามตารางที่ 6

Table 6 Confidence levels and the chance of an accident.

Level	Reliability	rate	Accident probability	rate
1	Very Low	0.10-0.20	Very High	0.90-1.00
2	Low	0.30-0.40	High	0.60-0.80
3	Moderate	0.50	Moderate	0.50
4	Good	0.60-0.80	Low	0.30-0.40
5	Very good	0.90-1.00	Very Low	0.10-0.20

ที่มา: มัลลิกา (2542)

จากตารางที่ 5 และ 6 ค่าความเชื่อมั่นน้อยแสดงว่าโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุสูง และค่าความเชื่อมั่นสูงแสดงว่าโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุต่ำ ดังนั้นสรุปได้ว่า โอกาสของการเกิดอุบัติเหตุจากงานยกโครงเหล็กเสริมจากการใช้เครน การผลัดตกจากนั่งร้าน การติดตั้งโครงเหล็ก ดังตารางที่ 9

Table 7 Interpretation of analysis result, reliability and accident probability from using crane, falling from scaffolding and installing steel structures.

Accident	Accident probability	Reliability
1. From using crane	High	Low
2. From falling from scaffolding	High	Low
3. From installing steel structures	High	Low

จากตารางที่ 7 จะเห็นว่ามีความเสี่ยงสูงและสูงมากในการเกิดอุบัติเหตุจึงได้ทำแผนบริหารเสี่ยงจากผลการประเมินความเสี่ยงงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริม สาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุในการติดตั้งเกิดจากเหตุการณ์พื้นฐาน (Basic Event) เหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งหรือทุกเหตุการณ์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่แท้จริง

Table 8 List of risk and danger report of lifting steel structures reinforced with Diaphragm Wall in the construction project of MRT Orange Line (Thailand Cultural Center- Minburi).

Work procedures	Risks	Potential effects
1. Lifting steel structures to be installed in the pit of **Diaphragm Wall**	- The ground supports crane weight while the steel structures cannot be lifted	- Cranes and steel structures fall over operators to get injured and cause damages to property
	- Controlling crane that may be spinning while lifting the steel structures	- The cranes lose balance and flip over the operators to get injured and cause damages to properties

Table 9 Total safety regulation and machine (mobile crane vehicle) procedures

Procedures of working	Potential dangers	Accident prevention measure
1. Lift steel structure to be installed in the pits	1. While standing to arrange steel structures on scaffolding, the operator may fall 2. The steel structure may pinch or hit a hand while replacing the steel structures 3. Dangers from losing center of gravity of the cranes	1. Provide enough space to stand on the scaffolding and wear a safety belt with stable and durable rail 2. There must be a person giving sign while installing and working 3. Put crane on the ground without slope, check the crane condition before working and check conditions of a driver with a person giving signs at the crane

Table 10 Monthly Safety Program Lifting and installing of reinforced steel structures, construction of retaining wall in the soil layer

Description	March 2019																													
	F	SA	S	M	T	W	TH	F	SA	S	M	T	W	TH	F	SA	S	M	T	W	TH	F	SA	S	M	T	W	TH	F	SA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Train newcomers	/	/		/	/	/	/	/			/	/	/	/	/			/	/	/	/	/			/	/	/	/	/	
Training for operators																									/					
Instructions before operations					/			/				/			/				/			/				/			/	
Check machines, cranes and equipment	/	/		/	/	/	/	/			/	/	/	/	/				/	/	/	/	/		/	/	/	/	/	

สรุป

ในการประเมินความเสี่ยงงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริมงานก่อสร้างกำแพงกันดินแบบขุดหล่อในชั้นดิน โดยการประเมินความเสี่ยง Fault Tree Analysis (FTA) การศึกษาหาความเสี่ยงงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริมงานก่อร้างกำแพงกันดินแบบขุดหล่อในชั้นดิน ซึ่งโอกาสการเกิดอุบัติเหตุจากการใช้เครนมีค่า 0.701 ค่าความเชื่อมั่น 0.299 แสดงให้เห็นว่ามีโอกาสเกิดอุบัติเหตุสูง โอกาสการเกิดอุบัติเหตุจากการผลัดตกจากนั่งร้านของพนักงานมีค่า 0.668 ค่าความเชื่อมั่น 0.332 แสดงให้เห็นว่ามีโอกาสเกิดอุบัติเหตุสูง และโอกาสการเกิดอุบัติเหตุจากการติดตั้งโครงเหล็กเสริมค่า 0.699 ค่าความเชื่อมั่น 0.301 แสดงให้เห็นว่ามีโอกาสเกิดอุบัติเหตุสูง ซึ่งสาเหตุที่สำคัญมาจากการปฏิบัติงานที่ผิดพลาด ความเครียด อ่านค่าผิด เร่งรีบทำงานเกินไป และอุปกรณ์เกี่ยวกับงานยกชำรุดบกพร่องขณะปฏิบัติงานงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริมงานก่อสร้างกำแพงกันดินแบบขุดหล่อในชั้นดิน ผลการศึกษาหาความเสี่ยงพบว่า โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุจากงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริมงานก่อร้างกำแพงกันดินแบบขุดหล่อในชั้นดินโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุสูง จากการศึกษาได้แสดงให้ทราบถึงค่าความเชื่อมั่น และค่าโอกาสการเกิดอุบัติเหตุ จากการเก็บสถิติอุบัติเหตุก่อนเริ่มจัดทำแผนบริหารลดความเสี่ยงมีจำนวน 12 ครั้งหลังจากการวางแผนบริหารลดความเสี่ยงของอุบัติเหตุต่อผู้ปฏิบัติงานร่วมกับเครนและอุปกรณ์ต่าง ๆ งานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริมงานก่อสร้างกำแพงกันดินแบบขุดหล่อในชั้นดินในการยก โดยใช้ระยะเวลาเท่ากันจะเห็นได้ว่าอุบัติเหตุลดลงจำนวน 6 ครั้ง คิดเป็น 50 เปอร์เซ็นต์

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้ ได้ผลสรุปเพียงการทราบค่าสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดอุบัติเหตุจากงานยกติดตั้งโครงเหล็กเสริมงานก่อสร้างกำแพงกันดิน ซึ่งผู้ที่จะทำการศึกษาต่อไปสามารถนำมาตรการป้องกันอุบัติเหตุจากการวิจัยครั้งนี้ไปดำเนินงานต่อไป เพื่อให้ทราบว่าเหตุลดลงจริงหรือไม่ในลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน

เอกสารอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2543. **พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535**. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

ณรงค์ ทัศนนิพัทธ์. 2544. **กำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อในชั้นดินกรุงเทพ.** เซฟโก้ จำกัด, กรุงเทพฯ.

มัลลิกา บุญนาค. 2542. **สถิติเพื่อตัดสินใจ.**โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

Crowl, D.A. and J.F. Louvar. 2002. **Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications.** 2nd eds. Prentics Hall, Eangleswood Cliffs, New Jercy.

Louvar, J. and B.D. Louvar. 1998. **Health and Environmental Risk Analysis.** Printice Hall, New York.

การศึกษาศักยภาพของพื้นที่เพื่อพัฒนาที่อยู่อาศัยในพื้นที่โดยรอบท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

A Study of Potential Area for Housing Development in Surrounding Area of Suvarnabhumi Airport

ดนัย ศรีสังวร[1*] และ สญชัย ลบแย้ม[1]

Danai Srisungvorn[1*] and Sonchai Lobyaem[1]

บทคัดย่อ

การวางแผนพัฒนาพื้นที่รอบท่าอากาศยาน ที่ให้ความสำคัญด้านการวางระบบเมืองและระบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยมีหลักเกณฑ์สำคัญ คือ 1) การวางแผนด้านคมนาคม 2) การวางแผนและออกแบบพัฒนาพื้นที่เศรษฐกิจ และ 3) การพัฒนาย่านที่อยู่อาศัยให้เหมาะสมและปลอดภัย ซึ่งใช้แนวคิดการพัฒนาพื้นที่รอบท่าอากาศยานขนาดใหญ่ (Airport-Oriented Development: AOD) และทฤษฎีเมืองศูนย์กลางการบิน (Aerotropolis) ให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาในระดับภูมิภาคมากขึ้น โดยใช้วิธีวิจัยเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค Potential Surface Analysis (PSA) และ Sieve Mapping ด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูลในพื้นที่ศึกษาจากหน่วยงานและแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ในช่วงเวลาดำเนินการวิจัย ตั้งแต่ มีนาคม 2561 ถึง มกราคม 2562 เพื่อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาที่อยู่อาศัยพื้นที่โดยรอบท่าอากาศยาน จากการศึกษาพบว่า พื้นที่ที่มีความเหมาะสมมากในการพัฒนาที่อยู่อาศัย อยู่ในพื้นที่อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ และพื้นที่เขตประเวศ เขตมีนบุรี ของกรุงเทพมหานคร เมื่อนำมาคำนวนสัดส่วนในแต่ละพื้นที่แล้ว พบว่า พื้นที่ที่มีสัดส่วนมากที่สุดแยกตามเขตการปกครองได้ดังนี้ คือ เขตสะพานสูง มีสัดส่วนคิดเป็น ร้อยละ 75.01 ของพื้นที่ รองลงมาเป็น เขตประเวศ มีสัดส่วนคิดเป็น ร้อยละ 57.28 ของพื้นที่ และ เขตมีนบุรี มีสัดส่วนคิดเป็น ร้อยละ 35.91 ของพื้นที่

ABSTRACT

The development plan for the areas surrounding airport which focuses on urbanization and other relevant systems in order criteria; 1) Transportation planning 2) Economic space development planning and designing 3) Residential area developing for suitability and safety through Airport-Oriented Development (AOD) which will expand the concept of Aerotropolis to be more clear and compliant with national development plan. The researcher employed the qualitative research methodology in this study the Potential Surface Analysis (PSA) technique and Sieve Mapping technique by collecting data in the study area from relevant departments and sources During the research period from March 2018 to January 2019 to study the area potential for residence development of the surrounding area Suvarnabhumi Airport. The objective of this study is to propose the recommendation for housing development in the area of Bang Phli District Samut Prakan Province and Prawet District, Min Buri District of Bangkok. When calculating the proportion in each area, it is found that the area with the highest proportion can be divided according to administrative areas as follows: Saphan Sung District has a proportion of 75.01 percent of the area, followed by Prawet District with a percentage of 100 57.28 percent of the area and Min Buri area accounts for 35.91 percent of the area.

Key words: land suitability analysis, airport-oriented development, air safety zones, Geographic Information System (GIS)

* Corresponding author; e-mail address: Danai.intheshadow@gmail.com

[1]ภาควิชาการออกแบบและวางผังชุมชนเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร กรุงเทพฯ 10200

[1]Department of Urban Design and Planning, Faculty of Architecture, Silpakorn University, Bangkok 10200

คำนำ

องค์กรการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (The International Civil Aviation Organization : ICAO) ได้กำหนดความเหมาะสมในการเลือกที่ตั้งท่าอากาศยานไว้ว่า ต้องเป็นพื้นที่โล่ง ปราศจากสิ่งกีดขวางทางการบิน แต่เนื่องจากปัจจัยทางด้านความสะดวกในการเดินทาง ทำให้ท่าอากาศยานต้องไม่อยู่ห่างจากชุมชนเมืองมากนัก (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ,2546) ท่าอากาศยานจึงกลายเป็นแรงดึงดูดทางด้านเศรษฐกิจ เป็นแหล่งจ้างงานขนาดใหญ่ มีโครงสร้างพื้นฐานที่ดี ส่งผลให้บริเวณโดยรอบท่าอากาศยานกลายเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพในการพัฒนาสูง (ฐาปนา, 2559) ทั้งจากภาคเอกชนและนโยบายของรัฐและการลงทุนด้านต่าง ๆ เช่น จากแผนยุทธศาสตร์โครงการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor : EEC) ทั้งนี้จากการที่ท่าอากาศยานเป็นองค์ประกอบสำคัญระดับประเทศมีพื้นที่ขนาดใหญ่ครอบคลุมหลายเขตการปกครอง มีการตั้งถิ่นฐานเดิมและที่ขยายตัวขึ้นใหม่ (Doxiadis, 1968) จากนโยบายส่งเสริมให้ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิเป็นเมืองศูนย์กลางการบิน ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิจึงเป็นศูนย์กลางการคมนาคมทั้งทางอากาศ ทางราง ทางถนน และทางน้ำ มีชุมชนขนาดเล็กในพื้นที่ศึกษาเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก มีบทบาททั้งเป็นชุมชนหลัก รอง และ เป็นแหล่งงาน การค้าและการบริการ อุตสาหกรรม คลังสินค้าโลจิสติกส์ สถาบันการศึกษา สถาบันราชการ และศาสนาที่หลากหลาย ที่มีความซับซ้อนเชิงโครงสร้างเมืองระดับภูมิภาค การพัฒนาชุมชนต่าง ๆ โดยรอบท่าอากาศยาน ที่ผ่านมาเป็นการพัฒนาที่ยังขาดแนวทางที่ชัดเจน เกิดการพัฒนาที่ไม่มีแบบแผน รวมถึงผลกระทบจากกิจกรรมของท่าอากาศยานที่ประกอบด้วยผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคมต่อลักษณะของชุมชนโดยรอบท่าอากาศยาน ส่งผลกระทบต่อการพัฒนาพื้นที่ในระดับชุมชนไปจนถึงระดับภูมิภาค ซึ่งผลกระทบเหล่านี้มีแนวโน้มจะเพิ่มความรุนแรงมากขึ้นตามการขยายตัวของเมืองและท่าอากาศยาน (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2556)

อุปกรณ์และวิธีการ

ผู้วิจัยจะใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยเทคนิค (Potential Surface Analysis : PSA) วิเคราะห์ศักยภาพของพื้นที่ เพื่อแสดงค่าคะแนนต่อพื้นที่ตามวัตถุประสงค์

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดปัจจัยในการวิเคราะห์พื้นที่โดยเป็นปัจจัยทางกายภาพที่เกี่ยวข้องและข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ที่ได้จากการรวบรวมข้อมูล โดยมีพื้นที่ศึกษาบริเวณโดยรอบท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ขนาดพื้นที่ประมาณ 600 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมเขตปลอดภัยในการเดินอากาศ และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของท่าอากาศยาน ประกอบด้วย พื้นที่ทั้งหมดของเขตประเวศ เขตสะพานสูง เขตมีนบุรี เขตลาดกระบัง ของกรุงเทพมหานคร และ อำเภอบางพลี อำเภอบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดค่าน้ำหนักของปัจจัยและวิเคราะห์ศักยภาพของพื้นที่ด้วยการซ้อนทับข้อมูลปัจจัยด้วยโปรแกรมประยุกต์ด้านภูมิสารสนเทศ โดยแสดงศักยภาพของพื้นที่ออกมาในรูปแบบของแผนที่ที่แสดงพื้นที่ที่มีความเหมาะสม

หลักการที่สำคัญของ PSA คือ การให้ค่าน้ำหนักของปัจจัยต่าง ๆ โดยที่การให้ค่าน้ำหนักจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์กับทางเลือก (Decision Rules) ทำให้ผู้วิจัยทราบว่า เมื่อวัตถุประสงค์ข้อใด

มีความสำคัญมาก ผลที่เกิดขึ้นกับการศึกษาจะเป็นอย่างไร สมการที่ใช้ในการศึกษา คือ Simple Additive Weighting Methods : SAW มีสมการดังนี้

$$S = W1(X1) + W2(X2) + W3(X3) + ... + Wn(Xn)$$

เมื่อ S คือ ระดับค่าคะแนนรวมแสดงศักยภาพของพื้นที่

Wn คือ ค่าคะแนนรวมแสดงความสำคัญของปัจจัยที่ n (Weight)

Xn คือ ค่าคะแนนความเหมาะสมของช่วงปัจจัยที่ n (Criteria Score)

ในขั้นตอนการให้ค่าน้ำหนักของปัจจัยต่าง ๆ จะกระทำโดยผู้เชี่ยวชาญในแต่ละด้าน พิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพ กฎหมาย ข้อกำหนด และข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ซึ่งเป็นข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ประเภทหนึ่งที่เก็บข้อมูลอยู่ในรูปแบบเวคเตอร์ (Vector) ใน 3 ลักษณะ คือ จุด (Point) เส้น (Line) และรูปปิด (Polygon) ซึ่งจะแยกเก็บออกเป็นชั้นข้อมูล (Layer)

การกำหนดค่าความสำคัญของปัจจัย

ในการกำหนดค่าความสำคัญของปัจจัยจะอาศัยเทคนิคกระบวนการตัดสินใจแบบมีลำดับขั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) และเทคนิคการเปรียบเทียบเชิงคู่ (Pairwise Comparison) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่าความสำคัญของปัจจัยหลัก (Weighting Factor) โดยให้ผลรวมของปัจจัยหลักทั้งหมดเป็น 100 สำหรับปัจจัยหลักแต่ละด้าน จากการหารือผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 8 ท่าน โดยแยกเป็น ผู้เชี่ยวชาญด้านผังเมืองและสภาพแวดล้อม 2 ท่าน ผู้เชี่ยวชาญด้านผังเมืองและภูมิสถาปัตยกรรมศาสตร์ 1 ท่าน ผู้เชี่ยวชาญด้านเศรษฐศาสตร์ 1 ท่าน ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม 2 ท่าน ผู้เชี่ยวชาญด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม 1 ท่าน และผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมการบิน 1 ท่าน ได้ค่าคะแนนเฉลี่ยดังนี้

- ปัจจัยด้านโครงสร้างพื้นฐาน (ค่าความสำคัญร้อยละ 27)
- ปัจจัยด้านประชากรและความหนาแน่น (ค่าความสำคัญร้อยละ 16)
- ปัจจัยด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม (ค่าความสำคัญร้อยละ 34)
- ปัจจัยด้านกฎหมาย และข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง (ค่าความสำคัญร้อยละ 23)

2. กำหนดค่าความสำคัญของปัจจัยย่อย ซึ่งประกอบด้วย

2.1 ปัจจัยด้านโครงสร้างพื้นฐาน จำนวน 7 ปัจจัยย่อย ดังนี้

- พื้นที่ให้บริการของสถานศึกษาขั้นพื้นฐาน
- การเข้าถึงสถานบริการสาธารณสุข เช่น โรงพยาบาล โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล
- การเข้าถึงเส้นทางคมนาคมทางถนนสายประธานและถนนสายหลัก
- การเข้าถึงเส้นทางคมนาคมทางถนนสายรองและถนนท้องถิ่น
- การเข้าถึงสถานีรถโดยสารสาธารณะ เช่น สถานีรถไฟ สถานีรถไฟฟ้า (ชูเกียรติ, 2554)
- ระยะห่างจากศาสนสถาน เช่น วัด มัสยิด คริสตจักร
- พื้นที่ให้บริการของสวนสาธารณะ สนามกีฬา แหล่งนันทนาการ สถานที่ท่องเที่ยว

2.2 ปัจจัยด้านประชากรและความหนาแน่น จำนวน 2 ปัจจัยย่อย ดังนี้

- ความหนาแน่นที่อยู่อาศัย แยกตามพื้นที่ท้ายประกาศผังเมืองรวม
- ระยะห่างจากพื้นที่ชุมชนเมืองเดิม

2.3 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม จำนวน 5 ปัจจัยย่อย ดังนี้

- พื้นที่ผลกระทบด้านเสียง (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2556)
- พื้นที่ผลกระทบด้านอากาศ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2556)
- พื้นที่เสี่ยงอุทกภัย (น้ำท่วม)
- ระยะห่างจากแหล่งน้ำและทางน้ำธรรมชาติ
- พื้นที่อุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อพื้นที่ชุมชน

2.4 ปัจจัยด้านกฎหมายและข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย 3 ปัจจัยย่อย ดังนี้

- เขตปลอดภัยทางเดินอากาศ
- เขตควบคุมอาคาร
- ข้อกำหนดด้านผังเมือง

ด้วยเทคนิคการเปรียบเทียบเชิงคู่ (Pairwise Comparison) เป็นการเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยย่อยทีละคู่ โดยผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องในแต่ละด้านตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เพื่อกำหนดหรือตัดสินว่าปัจจัยใดมีความสำคัญมากกว่า สำหรับค่าความสำคัญในการเปรียบเทียบเชิงคู่มีหลักการให้คะแนน ดังนี้

- ถ้าปัจจัยในแนวตั้งมีความสำคัญมากกว่าปัจจัยในแนวนอน จะให้ค่าเปรียบเทียบเท่ากับ 3
- ถ้าปัจจัยในแนวตั้งมีความสำคัญเท่ากับปัจจัยในแนวนอน จะให้ค่าเปรียบเทียบเท่ากับ 2
- ถ้าปัจจัยในแนวตั้งมีความสำคัญน้อยกว่าปัจจัยในแนวนอน จะให้ค่าเปรียบเทียบเท่ากับ 1

3. การหาค่าความสำคัญของปัจจัยย่อย เมื่อทำการเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยย่อยด้วยเทคนิคการเปรียบเทียบเชิงคู่จนครบแล้ว ให้ทำการหาผลรวมค่าความสำคัญจากการเปรียบเทียบเชิงคู่ของปัจจัยย่อยนั้นและทำการหาร้อยละของค่าความสำคัญของปัจจัยย่อยที่อยู่ในปัจจัยหลักนั้นๆ โดยเมื่อนำร้อยละของค่าความสำคัญของปัจจัยย่อยที่อยู่ในปัจจัยหลักนั้น ๆ มาคูณกับค่าความสำคัญของปัจจัยหลัก จะได้เป็นค่าความสำคัญของปัจจัยย่อยนั้น ดังสมการ

ค่าความสำคัญของปัจจัยย่อย = ค่าความสำคัญของปัจจัยหลัก x ร้อยละค่าความสำคัญของปัจจัยย่อยที่อยู่ในปัจจัยหลักนั้นๆ

การกำหนดพื้นที่กันออกในปัจจัยย่อย

ในปัจจัยย่อยต่างๆ จะมีการกำหนดพื้นที่ที่ไม่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ศักยภาพได้ เนื่องจากมีข้อกำหนดหรือกฎหมายที่สงวนหรือห้ามใช้พื้นที่ดังกล่าว หรือเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงซึ่งอาจเกิดอันตรายหรือความไม่ปลอดภัยหากมีการพัฒนาหรือมีกิจกรรมของสถานที่รองรับฯ ซึ่งมีรายละเอียดของพื้นที่กันออกและข้อกำหนดหรือกฎหมายที่นำมาใช้อ้างอิง ดังนี้

1. พื้นที่ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ตามประกาศ กระทรวงคมนาคม พ.ศ. 2549 และ พื้นที่ท่าอากาศยานของสำนักงานการบินพลเรือน: CAAT

2. พื้นที่อุตสาหกรรมและคลังสินค้า อ้างอิงพื้นที่ตามประกาศ ผังเมือง กรุงเทพมหานคร และสมุทรปราการ ปี พ.ศ. 2556

3. พื้นที่ตั้งของบริการพื้นฐานของพื้นที่เมือง เช่น สถานศึกษา สถานพยาบาล ไม่ว่าจะเป็นที่ตั้งของสาธารณูปโภค และสาธารณูปการต่าง ๆ เป็นโครงสร้างที่จำเป็นต่อการพัฒนาเมืองซึ่งต้องกำหนดให้เป็นพื้นที่กันออก จากพื้นที่ที่จะนำมาพัฒนาเมือง เช่น บ่อบำบัดน้ำเสีย โรงงานกำจัดขยะ โรงไฟฟ้า สถานีไฟฟ้า พื้นที่ฝังกลบสารพิษ เขตทหาร เป็นต้น

4. พื้นที่ที่ควรอนุรักษ์และฟื้นฟูไว้เป็นแหล่งประวัติศาสตร์และวัฒนธรรม (ณัฐวุฒิ, 2561) เนื่องจากผลจากการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมอาจส่งผลทำให้พื้นที่ที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์หลายแห่งมีสภาพทรุดโทรม ขาดการดูแลเอาใจใส่และการควบคุมการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณโดยรอบทำให้เกิดความขัดแย้งในการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณโดยรอบพื้นที่แหล่งประวัติศาสตร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรุกล้ำของพื้นที่เมืองและกิจกรรมทางเศรษฐกิจต่าง ๆ เข้าไปในพื้นที่ประวัติศาสตร์อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการบุกรุกและทำลายโบราณสถานต่าง ๆ ซึ่งจะยากต่อการบริหารจัดการพื้นที่ในอนาคต ดังนั้นพื้นที่เหล่านี้ควรจะได้รับการอนุรักษ์และฟื้นฟูมรดกทางวัฒนธรรมที่มีคุณค่าเหล่านี้ไว้ไม่ให้สูญหายและถูกทำลายไป โดยพื้นที่ที่ควรอนุรักษ์และฟื้นฟูไว้เป็นแหล่งประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมของอนุภาคจะประกอบด้วย แหล่งศิลปกรรม พื้นที่โบราณสถานที่มีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ เป็นต้น

5. พื้นที่ที่อยู่ห่างจากแหล่งน้ำผิวดินน้อยกว่า 50 เมตร พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535

6. พื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดน้ำท่วมซ้ำซาก อ้างอิงตามแผนที่น้ำท่วมซ้ำซากของศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศ กรมการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (ปภ.)

7. พื้นที่ที่อยู่ห่างจากแนวสายส่งไฟฟ้าศักย์สูงน้อยกว่า 40 เมตร อ้างอิงตามประกาศการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เรื่อง ข้อกำหนดเพื่อความปลอดภัยในเขตเดินสายไฟฟ้า ได้กำหนดบริเวณที่จะเดินสายส่งไฟฟ้ามีความกว้างจากแนวศูนย์กลางของเสาสายส่งไฟฟ้าด้านละไม่เกิน 40 เมตร รวมทั้งกำหนดข้อห้ามการกระทำการใด ๆ ในเขตเดินสายฟ้าเพื่อประโยชน์แห่งความปลอดภัยในการส่งพลังงานไฟฟ้า

ผลการการวิเคราะห์ศักยภาพของพื้นที่

เมื่อผู้วิจัยได้วิเคราะห์ศักยภาพของพื้นที่ตามเงื่อนไขและเกณฑ์การให้คะแนนแล้ว จะทำการซ้อนทับข้อมูลปัจจัยด้วยโปรแกรมประยุกต์ด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ และแสดงศักยภาพของพื้นที่ออกมาในรูปของแผนที่แสดงพื้นที่ที่มีความเหมาะสมตามลำดับ ซึ่งความเหมาะสมของพื้นที่เป็นไปตามเกณฑ์การวิเคราะห์ศักยภาพของพื้นที่ที่อยู่อาศัยจากคู่มือกรมโยธาธิการและผังเมือง (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552) ที่ใช้ในการศึกษานี้เท่านั้น นอกจากนี้ สำหรับพื้นที่ที่ขาดความเหมาะสม นั้นไม่ได้หมายความว่า พื้นที่นั้นไม่สามารถตั้งหรือพัฒนาพื้นที่อยู่อาศัยชุมชนได้ แต่หมายถึงพื้นที่นั้นมีข้อด้อยเชิงพื้นที่ในบางปัจจัยจึงทำให้มีความเหมาะสมน้อยเท่านั้น ดังนั้น หากในอนาคตข้อกำหนดหรือกฎหมายที่เกี่ยวข้องมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม อาจทำให้ความเหมาะสมของพื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงไปได้เช่นเดียวกัน

การกำหนดระดับความเหมาะสมของพื้นที่โดยรอบท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เมื่อประมวลผลคัดกรองพื้นที่ (Sieve Analysis) ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) โดยนำค่าคะแนนของแต่ละปัจจัยคูณกับค่าความสำคัญจะได้ผลเป็นค่าคะแนนรวมของแต่ละหน่วยพื้นที่ เพื่อให้สะดวกต่อการพิจารณาจึงกำหนดแบ่งระดับความเหมาะสมของพื้นที่ออกเป็น 4 ระดับ คือ พื้นที่ที่มีความเหมาะสมมาก (Most Suitable) พื้นที่ที่มีความเหมาะสมปานกลาง (Moderate Suitable) พื้นที่ที่มีความเหมาะสมน้อย (Less Suitable) และพื้นที่ที่ไม่มีความเหมาะสมหรือพื้นที่กันออก (Restrictive Area) ดัง Figure 1

เมื่อทำการซ้อนทับกับข้อมูลต่าง ๆ ก็จะได้ข้อมูลเบื้องต้นของพื้นที่ศักยภาพ ที่มีค่าคะแนนรวมของปัจจัยต่าง ๆ มากที่สุด โดยผู้วิจัยสามารถนำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้เบื้องต้นนี้ นำไปเป็นข้อมูลเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับการกำหนดข้อเสนอเสนอแนะในพื้นที่

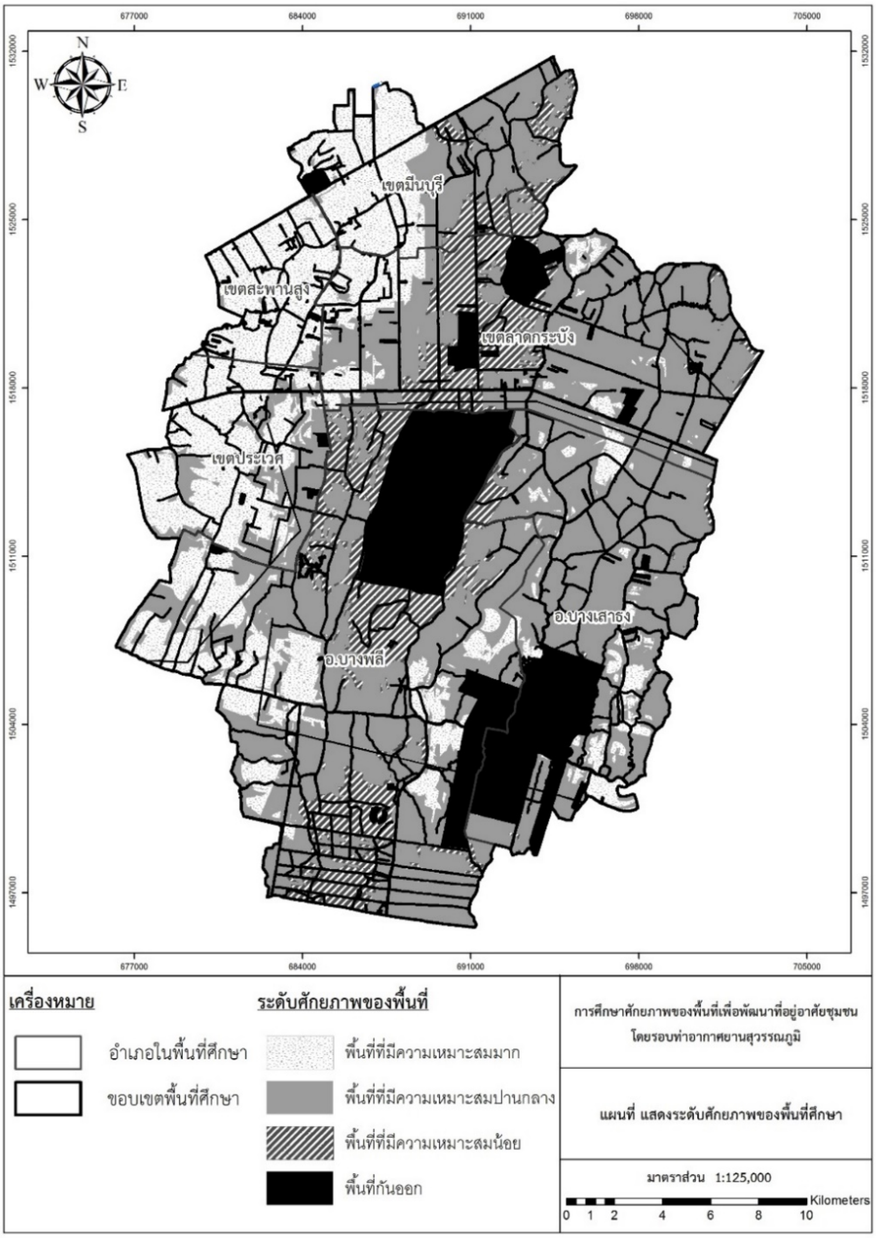


Figure 1 Results of area suitability analysis.

สรุป

จากผลการศึกษาพบว่าพื้นที่โดยรอบท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ มีข้อจำกัดและอุปสรรคในการพัฒนาที่อยู่อาศัย คือ การกำหนดให้พื้นที่ส่วนใหญ่ของบริเวณพื้นที่โดยรอบท่าอากาศยานสุวรรณภูมิเป็นพื้นที่รองรับการระบายน้ำ ทำให้เป็นปัจจัยหลักที่ไม่อาจพัฒนาพื้นที่ให้เป็นที่อยู่อาศัยได้ ตลอดจนการกำหนดพื้นที่และกิจกรรมที่ไม่ชัดเจนของพื้นที่โดยรอบท่าอากาศยาน

พื้นที่ด้านทิศเหนือและทิศใต้ของท่าอากาศยานอยู่ในเขตที่ได้รับผลกระทบจากมลภาวะทางเสียงอากาศ กิจกรรมของการบิน รวมทั้งเขตควบคุมอาคาร เป็นพื้นที่เสี่ยงต่อความปลอดภัยของชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักด้านกฎหมายและข้อบังคับที่เกี่ยวข้องที่ทำให้ผลการวิเคราะห์ศักยภาพพื้นที่ในเขตสะพานสูงมีค่าคะแนนความเหมาะสมในการพัฒนาสูงที่สุด และพื้นที่อำเภอบางพลีมีค่าคะแนนความเหมาะสมในการพัฒนาน้อยที่สุด จากการศึกษายังพบว่าในบางพื้นที่ของพื้นที่ศึกษายังสามารถพัฒนาเป็นที่อยู่อาศัยที่ดีและสอดคล้องกับการพัฒนาพื้นที่โดยรอบท่าอากาศยานได้ แต่ต้องกำหนดแผนการพัฒนาที่ชัดเจนและสอดคล้องกับปัญหาและข้อจำกัดของพื้นที่โดยอาศัยการวางระบบเมืองที่ไม่มุ่งเน้นการพัฒนาเพียงด้านใดด้านหนึ่งเท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาการออกแบบและวางผังชุมชนเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความรู้ความเข้าใจทางด้านผังเมือง และให้คำแนะนำตลอดการดำเนินการวิจัย ผู้เชี่ยวชาญที่ร่วมให้ความคิดเห็นในการวิจัย รวมทั้งหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชน ที่ให้ความสนับสนุนข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

เอกสารอ้างอิง

กรมโยธาธิการและผังเมือง,กระทรวงมหาดไทย. 2552. **การวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินและคมนาคมขนส่ง เพื่อการวางผังเมืองรวมโดยโปรแกรมประยุกต์.** กลุ่มงานพัฒนาเทคนิคการวางผัง สำนักพัฒนามาตรฐานผังเมือง กรมโยธาธิการและผังเมือง, กรุงเทพฯ.

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2556. **การศึกษารูปแบบการใช้ที่ดินเพื่อลดผลกระทบด้านเสียงจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ.** กลุ่มอากาศ เสียงและความสั่นสะเทือน ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

ชูเกียรติ สลักคำ. 2554. **ปัจจัยคุณภาพในกระบวนการวิเคราะห์ศักยภาพพื้นที่เพื่อการเลือกที่อยู่อาศัยบริเวณโดยรอบสถานีรถไฟฟ้าสายสีเขียว.** วิทยานิพนธ์การวางผังเมืองและสภาพแวดล้อมมหาบัณฑิต สาขาการวางผังเมืองและสภาพแวดล้อม, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ฐาปนา บุณยประวิตร. 2559. **เกณฑ์การพัฒนาที่ดินรอบอู่ตะเภา** (Online). http://tatp.or.th/aod-utapao, 5 มีนาคม 2561.

ณัฐวุฒิ รัตนสุนทร. 2561. **การใช้ประโยชน์พื้นที่โล่ง ว่างส่งเสริมอัตลักษณ์ชุมชน เพื่อดำรงอยู่ของภูมิทัศน์วัฒนธรรมชุมชนเก่าริมคลอง รอบท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ศึกษาเฉพาะกรณี ชุมชนตลาดเก่าบางพลี ริมคลองสำโรง จังหวัดสมุทรปราการ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มานัส ศรีวณิช. 2559. **การวิเคราะห์ศักยภาพด้านกายภาพทางพื้นที่เพื่อการวางแผนพัฒนาพื้นที่บริเวณรอบสถานีขนส่งมวลชนเชื่อมต่อกับชุมชนมหาวิทยาลัย.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2546. **โครงการวางแผนผังการพัฒนาเมืองศูนย์กลางการบินสุวรรณภูมิ.** สำนักนายกรัฐมนตรี, กรุงเทพฯ.

Doxiadis, C.A. 1968. **Ekistics: An Introduction to the Science of Human Settlements.** Oxford University Press, London.

Kasada, J.D. 2000. **Aerotropolis: Airport – Driven Urban Development.** ULI on the Future: Cities In the 21th Century. Urban Land Institute, Washington. D.C.

การทำนายอายุการใช้งานที่เหลือของฉนวนหม้อแปลงกำลัง

Predicting the Remaining Lifetime of Power Transformer Insulation

นาตยา คล้ายเรือง[1*] อรอุไร หนูหอม และ ณัฏพงศ์ ศรแจ่ม[1]

Nattaya Klairuang[1*], Onurai Noohawm and Nattapong Sornjam[1]

บทคัดย่อ

หม้อแปลงกำลังเป็นอุปกรณ์หลักในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีความสำคัญต่อความเชื่อถือได้และประสิทธิภาพของระบบการจ่ายไฟฟ้า การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทราบอายุการใช้งานที่เหลือของหม้อแปลงจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการวางแผนการบำรุงรักษาที่ต้องการลดต้นทุนและลดความเสี่ยงในการเกิดไฟฟ้าดับ บทความนี้นำเสนอวิธีการทำนายอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงกำลัง โดยประเมินสภาพฉนวนกระดาษจากปริมาณสารประกอบฟูรานในฉนวนน้ำมัน มีงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารประกอบฟูรานมีความสัมพันธ์กับระดับการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization, DP) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงสภาพของฉนวนกระดาษได้อย่างแม่นยำแต่ทดสอบได้ยากและเป็นการทดสอบแบบทำลาย จึงนำผลจากความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้ทำนายอายุที่เหลือของหม้อแปลงกำลัง โดยวิธีการที่นำเสนอนี้ใช้กับหม้อแปลงกำลังที่เป็นกรณีศึกษาจำนวนทั้งสิ้น 8 เครื่อง

ABSTRACT

Power transformers are vital assets in electricity power systems that are important for the reliability and efficiency of the electricity supply system. Analyzing the data to know the remaining lifetime of the transformer is important to the maintenance planning process that requires cost reduction and risk of outage. This article presents a method to predict the remaining service life of power transformers. By assessing the condition of paper insulation from the amount of furfural content in the oil insulation. There has been a lot of research showing that the amount of furan compounds is closely related to the degree of polymerization (DP), which is an accurate indication of the condition of paper insulation, but DP testing is destructive test and difficult. Therefore, use the results from relationship between Furan and DP to predict the remaining lifetime of the power transformers. The proposed method applies to a total of 8 power transformers were the case study.

Key words: power transformer, furan, degree of polymerization, remaining lifetime

* Corresponding author: e-mail address: nattaya@eng.src.ku.ac.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi 20230

คำนำ

หม้อแปลงกำลังเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบไฟฟ้า หากหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการชำรุดหรือขัดข้องจะไม่สามารถใช้งานได้ ทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง หรือกระบวนการผลิตหยุดชะงัก ดังนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ใช้งานได้เป็นปกติ โดยทั่วไปหม้อแปลงหลังจากผลิตจากโรงงานผู้ผลิตมักกำหนดอายุไขไว้ที่ 25 ถึง 40 ปี ซึ่งอาจพบว่าหม้อแปลงที่ให้บริการอยู่บางเครื่องมีอายุใกล้กับค่าที่กำหนดนี้ และบางเครื่องก็มีอายุเกินกว่าค่าที่กำหนดแล้ว ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องมีการประเมินสภาพหม้อแปลงเพื่อทำนายอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงสำหรับการวางแผนบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนหม้อแปลงทดแทนเพื่อป้องกันหม้อแปลงเกิดความเสียหายทำให้ไฟฟ้าดับโดยไม่มีการวางแผน ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับผู้ใช้ไฟหรือกระบวนการผลิตได้

จากข้อมูลทางสถิติของหม้อแปลงที่มีในปัจจุบันพบว่าแท็ปปรับระดับแรงดัน(tap changer) และบุชชิ่งเป็นส่วนที่หม้อแปลงเกิดการชำรุดมากที่สุด ลองลงมาคือระบบฉนวนหม้อแปลง แต่เนื่องจากทั้งสองส่วนแรกสามารถซ่อมแซมหรือเปลี่ยนได้ไม่ยากนัก เนื่องจากเป็นส่วนที่แยกจากตัวถังหลัก แตกต่างจากส่วนฉนวนหม้อแปลง โดยเฉพาะส่วนของฉนวนกระดาษ ซึ่งมักอยู่กับหม้อแปลงจนกระทั่งเลิกใช้งานหม้อแปลง ดั้งนั้นจึงเห็นได้ว่างานวิจัยต่างๆ มักวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของหม้อแปลงหรือทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงที่เหลืออยู่จากสภาพของฉนวนกระดาษเป็นหลัก จากการทบทวนงานวิจัยต่างๆ พบว่าแม้จะมีวิธีการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงที่แตกต่างกันมากมายหลายวิธี แต่จากการสังเกตพบว่ามักจะมีวิธีการทดสอบวินิจฉัย (diagnostic test) ตรวจหาความผิดพร่องที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงร่วมอยู่ในวิธีการประเมินด้วยเสมอ (Badune *et al.*, 2013) และการวัดค่า DP ของฉนวนแข็งเป็นที่ยอมรับมานานแล้วว่าเป็นการวิเคราะห์หาสภาพหรืออายุการใช้งานของฉนวนกระดาษ เมื่อฉนวนกระดาษเสื่อมสภาพลงจนถึงจุดที่ DP มีค่าเหลือประมาณ 200 ฉนวนกระดาษมักถูกพิจารณาว่าหมดอายุการใช้งานแล้ว ไม่สามารถคืนความแข็งแรงเชิงกลให้ฉนวนได้ หม้อแปลงไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติอีกต่อไป แต่การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่โดยพิจารณาจาก DP เพียงอย่างเดียวบางครั้งก็ทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากการตรวจวัดค่า DP จำเป็นที่จะต้องเปิดถังหม้อแปลงเพื่อนำฉนวนแข็งในบริเวณที่เกิดความร้อนสูงที่สุดไปทำการตรวจสอบจึงจะได้ค่าที่แม่นยำ ดังนั้น นอกจากการตรวจวัดค่า DP โดยตรงแล้วยังมีการตรวจหาสารประกอบฟูรานซึ่งคือกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ เนื่องจากความร้อนสูง การเกิดออกซิเดชัน กรด และการสลายตัวที่เกิดจากความชื้นสูงและออกซิเดชั่น ซึ่งเป็นการเร่งการทำลายฉนวนได้อีกด้วย ประกอบกับการทดสอบหาปริมาณสารประกอบฟูรานสามารถทำได้ตามช่วงเวลาคล้ายกับที่ทำการทดสอบ DGA โดยมาตรฐานกำหนดว่าเมื่อสารประกอบฟูรานมีค่ามากกว่า 250 ppb (Jahromi *et al.*, 2009) ควรเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลง เพื่อชะลอการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ เนื่องจากต่อจากนี้อายุการใช้งานที่เหลือของหม้อแปลงจะลดลงในอัตราที่สูง ปริมาณสารประกอบฟูรานในน้ำมันจึงมีประโยชน์อย่างยิ่งในการประมาณอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของฉนวนกระดาษ โดยในหลายๆงานวิจัยจะนำไปใช้ประเมินหาค่า DP ก่อนที่จะนำไปหาอายุที่เหลือของหม้อแปลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีผลการทดสอบหาสารประกอบฟูรานต่อเนื่องก่อนหน้าหลายๆครั้ง อย่างสม่ำเสมอ ก็จะสามารถนำมาเปรียบเทียบและพิจารณาแนวโน้มของผลที่เปลี่ยนแปลงไปได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ

ฉนวนกระดาษมักทำจากเยื่อไม้ที่ผ่านกระบวนการคราฟท์ซึ่งเยื่อไม้จะถูกผสมด้วย sodium hydroxide และ sodium sulfide ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของฉนวนกระดาษคือเซลลูโลสซึ่งเป็นโพลิเมอร์ธรรมชาติของกลูโคส เส้นใยเซลลูโลสประกอบด้วย กลุ่มโมเลกุลที่มีความยาวต่างกันเรียงติดกัน โดยถูกยึดเข้าด้วยกันโดยพันธะไฮโดรเจนที่รวมกันเป็นกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) ในโมเลกุลที่อยู่ติดกันซึ่งเชื่อมโยงเข้าด้วยกันผ่านพันธะ glycosidic ต่อมาฉนวนเซลลูโลสได้ผ่านการพัฒนาให้สามารถรับความร้อนได้มากขึ้น กระบวนการปรับปรุงด้านความร้อนมี 2 ประเภท คือการดัดแปลงพันธะเซลลูโลสโดยเฉพาะในกลุ่ม OH และ การเพิ่มสารเคมีเพื่อป้องกันเซลลูโลสจากกรดที่เกิดจากการเสื่อมสภาพตามอายุ

กลไกการสลายตัวของเซลลูโลสขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ฉนวนได้รับ โดยมี 4 ปัจจัยหลักที่กระตุ้นให้เกิดการเสื่อมสภาพ คือการสัมผัสกับ อุณหภูมิที่สูง ออกซิเจน กรด และความชื้น สาเหตุของการเสื่อมสภาพได้แก่ ความร้อน การเกิดออกซิเดชั่น และการเกิดไฮโดรไลติก แสดงในรูปที่ 1 กระบวนการย่อยสลายทั้ง 3 รูปแบบนี้ส่งผลให้เกิดการแยกโพลีเมอไรเซชัน กลูโคส ($C_6H_{10}O_5$) จะย่อยสลายต่อไปขึ้นอยู่กับสภาพของการเกิดสารประกอบฟูรานและผลิตภัณฑ์ทางเคมีอื่น ๆ เช่น น้ำ และก๊าซ

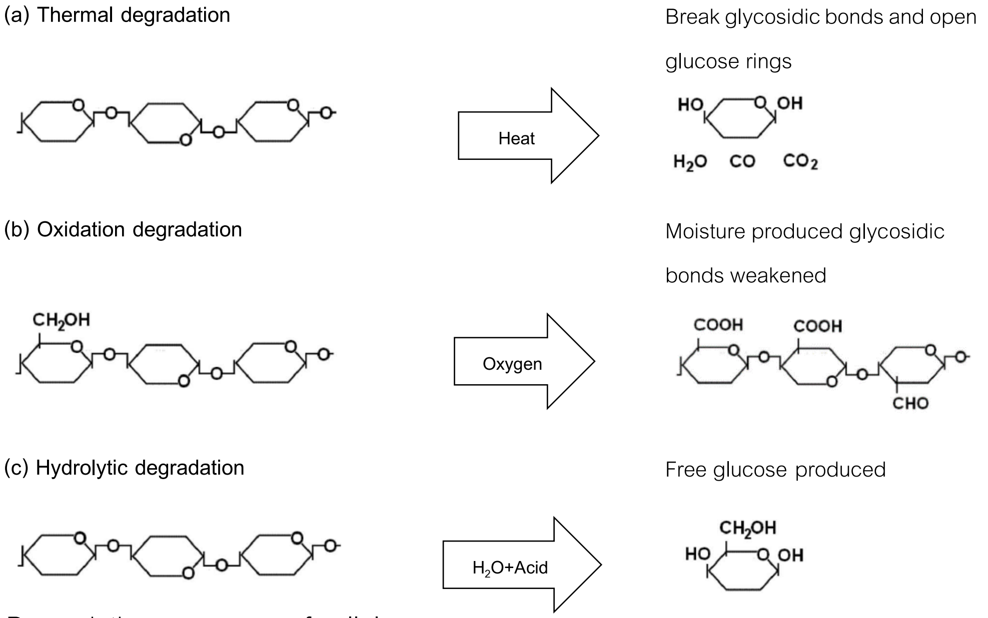


Figure 1 Degradation processes of cellulose paper.

การย่อยสลายเซลลูโลสเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ ซึ่งมีลักษณะเฉพาะโดยการสลายของโซ่โมเลกุล เพื่อประเมินระดับการย่อยสลายจำนวนของห่วงโซ่กลูโคสที่ประกอบด้วยโมเลกุลของเซลลูโลสจะถูกนำมาใช้เป็นหน่วยวัดคือค่า degree of polymerization หรือ DP ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ที่บอกถึงการสลายตัวของเซลลูโลสและความแข็งแรงเชิงกลของฉนวน ค่า DP ถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D4243 - 99 (2009) เป็นวิธีการทดสอบตามมาตรฐานสำหรับวัดค่าเฉลี่ย DP ของฉนวนกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วและแบบที่เป็นฉนวนใหม่ การทดสอบเป็นตามมาตรฐาน IEC 60450 การวัดค่า DP เป็นที่ยอมรับมานานแล้วว่าเป็นการวิเคราะห์หาสภาพหรืออายุการใช้งานของฉนวนกระดาษ โดยค่าที่วัดได้คือจำนวนหน่วยกลูโคสเฉลี่ยต่อห่วงโซ่เซลลูโลส หรือ

ความยาวของโมเลกุลเซลลูโลส ฉนวนกระดาษใหม่มีความยาวห่วงโซ่เฉลี่ยระหว่าง 1,100 ถึง 1,500 และการอบแห้งฉนวนหม้อแปลงหลังพันขดลวดแล้วค่า DP ของกระดาษจะลงเหลือประมาณ 1,000 ถึง 1,100 เมื่อฉนวนกระดาษเสื่อมสภาพลงจนถึงจุดที่ DP มีค่าเหลือประมาณ 200 อาจพิจารณาได้ว่ากระดาษหมดอายุการใช้งานแล้ว ไม่สามารถกู้คืนความแข็งแรงเชิงกลให้หม้อแปลงสามารถใช้งานตามปกติได้อีกต่อไป แม้ว่าหม้อแปลงหลายเครื่องจะยังคงใช้งานที่ระดับ DP ต่ำกว่า 200 ก็ตาม เนื่องจากการกำหนดค่า DP ให้เป็นจุดสิ้นสุดของฉนวนนั้นเป็นเรื่องของการตัดสินใจทางวิศวกรรมของแต่ละหน่วยงาน

การเกิดสารประกอบฟูรานในฉนวนน้ำมัน

ฟูราน (Furans) คือ กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษเนื่องจากความร้อนสูง การเกิดออกซิเดชัน กรด และการสลายตัวที่เกิดจากความชื้นสูงและออกซิเจน เป็นการเร่งการทำลายฉนวน การทดสอบหาปริมาณสารประกอบฟูรานสามารถทำการทดสอบได้ตามช่วงเวลา คล้ายกับการทดสอบ DGA เมื่อฉนวนเซลลูโลสสลายตัวเนื่องจากความร้อนสูง นอกจากจะเกิดก๊าซ CO2 และ CO แล้วจะมีสารประกอบฟูราน ถูกปล่อยออกมาละลายในน้ำมันด้วย เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษเซลลูโลสในหม้อแปลง จะเกิดสารประกอบฟูรานขึ้น โดยสารประกอบฟูรานบางส่วนสามารถละลายได้ในฉนวนเหลว(น้ำมัน) เมื่อพันธะเซลลูโลสแตกตัวในระหว่างที่มีการย่อยสลายฉนวนกระดาษ การแตกของแต่ละพันธะจะปลดปล่อยหน่วยโมโนเมอร์กลูโคสที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลายเป็นสารประกอบฟูรานและผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่นน้ำและก๊าซ โดยมักเกิดสารประกอบฟูราน 5 ชนิด ดังต่อไปนี้

1) 2-furaldehyde (2FAL)
2) 5-methyl-2-furaldehyde (5M2F)
3) 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde (5H2F)
4) 2-acetyl furan (2ACF)
5) 2-furfurol (2FOL)

สารประกอบที่สำคัญที่สุดที่สามารถบ่งบอกอายุของฉนวนกระดาษได้คือ 2-furfuraldehyde (2FAL) เมื่อต้องมีการทดสอบ DGA ในห้องปฏิบัติการ ก็สามารถทดสอบหาสารประกอบฟูรานเพื่อตรวจสอบหาการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษไปด้วยได้ ในหม้อแปลงที่มีสภาพดีจะตรวจไม่พบสารประกอบฟูรานหรือมีค่าน้อยมาก คือต่ำกว่า100 ppb ในกรณีฉนวนกระดาษเสื่อมสภาพจากความร้อนระดับสารประกอบฟูรานที่พบจะมีค่าสูงอย่างน้อย 100 ppb และอาจสูงถึง 70,000 ppb (Jahromi *et al.*, 2009)

Table 1 Causes of different types of Furan compounds.

Furfural Type	Diagnostic cause
5H2F, 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde	Oxidation
2FOL, 2-furfurol	High moisture
2FAL, 2-furaldehyde	General overheating or Normal ageing
2ACF, 2-acetyl furan	Rare, causes not fully defined
5M2F, 5-methyl-2-furaldehyde	High temperature

สารประกอบฟูราน (2FAL) ที่ละลายอยู่ในน้ำมันสามารถใช้ทำนายอายุที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงได้แต่ต้องมีการเก็บข้อมูล ประวัติการใช้งาน การซ่อม การเปลี่ยนถ่ายน้ำมัน ชนิดของหม้อแปลง เพราะสิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณสารประกอบฟูรานมีค่าไม่แน่นอน

ซึ่ง 2-Furaldehyde (2FAL) เป็นสารประกอบฟูรานตัวที่มีความสัมพันธ์กับการสลายตัวของเซลลูโลสฉนวนกระดาษ มากที่สุด ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลทดสอบสารประกอบฟูรานจะให้ความสำคัญกับปริมาณของ 2-Furaldehyde โดยมีเกณฑ์การตัดสินใจตามมาตรฐาน ASTM D5837 ดัง Table 2

Table 2 Criteria of ASTM D5837 standard.

Sealed Type Transformer	Condition
< 100 ppb	Normal
100-250 ppb	Questionable
> 250 ppb	Abnormal
Open Type Transformer	
> 1000 ppb	Abnormal

สำหรับหม้อแปลงแบบ seal type เมื่อฟูรานมีค่ามากกว่า 250 ส่วนต่อพันล้านส่วน (ppb) ควรเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลง สามารถพิจารณาผลร่วมกับค่า IFT (Interfacial Tension) และ acid number เพื่อประเมินสภาพหม้อแปลงได้ ปริมาณสารประกอบฟูราน ในน้ำมันมีประโยชน์อย่างยิ่งในการประมาณอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของฉนวนกระดาษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีผลการทดสอบก่อนหน้าหลายๆครั้ง สามารถนำมาเปรียบเทียบและพิจารณาแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงไปได้

ความสัมพันธ์ของค่า DP และปริมาณสารประกอบฟูราน 2FAL

ในทางปฏิบัติวิธีการทดสอบหาค่า DP มีความซับซ้อนและมีราคาแพงเนื่องจากมีความจำเป็นที่ต้องเปิดหม้อแปลงเพื่อนำตัวอย่างฉนวนกระดาษมาทดสอบ ดังนั้นจึงเกิดงานวิจัยหลายๆงานที่นำเสนอวิธีการในการประมาณค่า DP จากหลายๆปัจจัย เช่นจากประวัติโหลด อุณหภูมิ ความชื้น และประเมินจากปริมาณสารประกอบฟูราน ซึ่งวิธีการประเมินจากปริมาณสารประกอบฟูรานถือว่าเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมค่อนข้างมาก และมีความเชื่อถือได้สูง

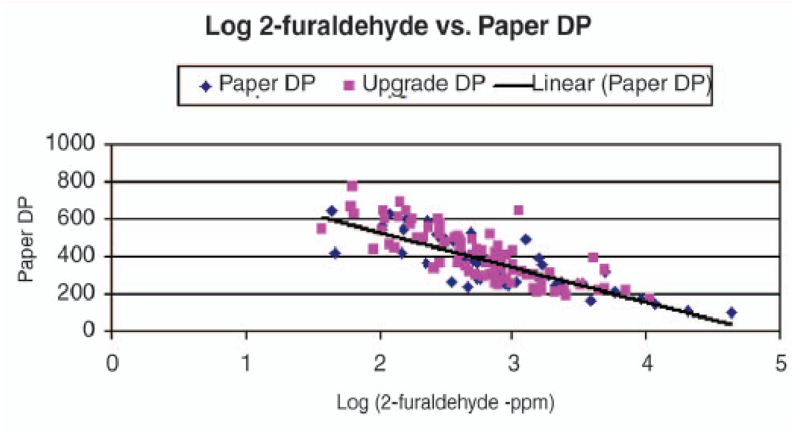


Figure 2 Relation of Degree of polymerization (DP) to log 2-furaldehyde from aging tests on Kraft and thermally upgraded paper (Luiz Cheim *et al.*, 2012).

ทั้ง DP และปริมาณสารประกอบฟูราน ต่างมีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งานของหม้อแปลง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารประกอบฟูราน ในน้ำมันและค่า DP ของกระดาษ (Luiz Cheim et al, 2012) ได้มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการเร่งให้ฉนวนกระดาษเกิดการเสื่อมอายุด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบพบว่าผลจากห้องปฏิบัติการเกือบทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าระหว่างลอการิทึมของระดับความเข้มข้นของ 2FAL ในน้ำมันและค่า DP ของฉนวนกระดาษคราฟท์ทั้งแบบธรรมดา และแบบปรับให้ทนอุณหภูมิสูงได้ล้วนมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นดังแสดงใน Figure 2

ยังมีงานวิจัยอีกจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารประกอบฟูราน 2FAL ในน้ำมันกับค่า DP ของฉนวนกระดาษ เนื่องจากการตรวจวัดค่า DP ทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีผู้นำเสนอโมเดลคณิตศาสตร์แสดงของความสัมพันธ์ของค่าทั้งสอง โดยไม่ต้องใช้การตรวจสอบแบบทำลายโดยการตัดกระดาษเพื่อไปทดสอบหาค่า DP โดยตรง เพื่อนำไปหาความเสื่อมที่เกิดกับฉนวนกระดาษ แล้วนำไปกำหนดอายุของฉนวนกระดาษหรืออายุของหม้อแปลงต่อไป สมการความสัมพันธ์ของนักวิจัยต่างๆ มีดังนี้ (Badune *et al.*, 2009)

(1) สมการของ Chendong

$$DP = \frac{\log_{10}[2FAL] - 1.51}{-0.0035} \tag{1}$$

โดยที่ 2FAL คือ ความเข้มข้นของ 2FAL ในน้ำมัน [mg/l หรือ ppm]

DP คือ ค่าของ degree of polymerization

Stebbins ได้เสนอสมการ โดยการปรับจากสมการของ Chendong เพื่อใช้สำหรับกระดาษที่ผ่านการปรับให้ทนอุณหภูมิสูงได้ (thermally upgraded paper)

(2) สมการของ Stebbins

$$DP = \frac{\log_{10}[2FAL \cdot 0.88] - 4.51}{-0.0035} \tag{2}$$

โดยที่ ค่า 2FAL ในสมการที่ (2) มีหน่วยเป็น ppb(parts per billion, μg/l)

(3) สมการของ De Pablo

$$DP = \frac{7100}{8.88 + 2FAL} \tag{3}$$

ต่อมา Pahlavanpour และคณะ ทำการศึกษาแล้วพบว่าการเสื่อมสภาพของกระดาษไม่สม่ำเสมอ โดยสันนิษฐานว่ามีฉนวนกระดาษ 20% ที่อยู่ด้านในเกิดการเสื่อมสภาพเร็วเป็นสองเท่าของฉนวนกระดาษส่วนอื่น

(4) สมการของ Pahlavanpour

$$DP = \frac{800}{[0.186 \cdot 2FAL] + 1} \tag{4}$$

(5) สมการของ Burton

$$DP = \frac{2.5 - \log_{10}[2FAL]}{0.005} \tag{5}$$

เมื่อนำสมการทั้ง 5 สมการข้างต้นมาคำนวณค่า DP เปรียบเทียบกับผลการทดสอบหม้อแปลงกำลังระบบ 115/22 kV แล้วพบว่าบางสูตรให้ค่าคำนวณแตกต่างจากค่าทดสอบค่อนข้างมาก ดังแสดงใน Table 3 ดังนั้นเพื่อให้ผลการคำนวณมีค่าแม่นยำใกล้เคียงกับค่าตรวจวัดจริงมากขึ้น ผู้วิจัยจึงขอนำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2FAL และ DP โดยหาค่าคงที่ต่างๆในสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (6)

(6) สมการนำเสนอ

$$DP = \frac{2.71 - \log_{10}[2FAL]}{0.00475} \tag{6}$$

โดยที่ค่า 2FAL ในสมการที่ (3)-(6) มีหน่วยเป็น ppm

การหาอายุที่เหลือของหม้อแปลงกำลัง

หลังจากวิเคราะห์หาค่า DP จากสมการต่างๆ ได้แล้ว สามารถนำผลที่ได้มาคำนวณหาอายุการใช้งานที่ใช้ไปตามสภาพการใช้งานจริงของหม้อแปลงได้ดังสมการ (Badune *et al.*, 2013)

$$\text{Elapsed life(in years)} = 20.5 \cdot \ln\left[\frac{1100}{DP}\right] \tag{7}$$

เมื่อทราบอายุการใช้งานตามสภาพของหม้อแปลงแล้วก็สามารถทำนายอายุที่เหลือของหม้อแปลงกำลังได้ หากหน่วยงานกำหนดระยะเวลาสูงสุดในการใช้หม้อแปลงไว้ ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดระยะเวลาใช้งานหม้อแปลงสูงสุดไว้ที่ 30 ปี ดังนั้นอายุที่เหลือของหม้อแปลงกำลังหาได้ดังนี้

$$\text{Remaining lifetime(in years)} = 30 - \text{Elapsed life} \tag{8}$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ข้อมูลหม้อแปลงกำลังที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ข้อมูลหม้อแปลงกำลังที่ใช้เป็นกรณีศึกษา มีจำนวนทั้งสิ้น 8 เครื่องเป็นหม้อแปลงระบบ 22/6.9 kV จำนวน 4 เครื่อง และระบบ 115/22 kV จำนวน 4 เครื่อง ข้อมูลประกอบด้วยอายุใช้งานจริงของหม้อแปลงตั้งแต่วันติดตั้งใช้งาน ผลทดสอบปริมาณสารประกอบฟูรานในหน่วย ppm และค่า DP (บางเครื่อง) แสดงใน Table 3

Table 3 Power transformer data and DP values from equation (1) to (6).

Name	Age	Furan from test	DP from Test	DP from Model					
22/6.9 kV				Chendong (1)	Stebbins (2)	De Pablo (3)	Pahlavanpour (4)	Burton (5)	Propose (6)
TR01	12	0.0064	-	1,058	1,074	799	799	939	1,032
TR02	12	0.0065	-	1,056	1,072	799	799	937	1,031
TR03	21	0.0350	-	847	863	796	795	791	877
TR04	21	0.0340	-	851	867	796	795	794	880
115/22 kV				Chendong	Stebbins	De Pablo	Pahlavanpour	Burton	Propose
TR05	24	0.610	636	493	509	748	718	543	616
TR06	27	0.860	585	450	466	729	690	513	584
TR07	22	0.716	613	473	489	740	706	529	601
TR08	25	0.665	624	482	498	744	712	535	608

Table 4 Remaining lifetime of power transformer.

Name	Age	Remaining lifetime [years]					
22/6.9 kV		Chendong	Stebbins	De Pablo	Pahlavanpour	Burton	Propose
TR01	12	29.2	29.5	23.4	23.4	26.8	28.7
TR02	12	29.2	29.5	23.4	23.4	26.7	28.7
TR03	21	24.7	25.0	23.4	23.3	23.2	25.4
TR04	21	24.7	25.1	23.4	23.3	23.3	25.4
115/22 kV		Chendong	Stebbins	De Pablo	Pahlavanpour	Burton	Propose
TR05	24	13.5	14.2	22.1	21.3	15.5	18.1
TR06	27	11.7	12.4	21.6	20.4	14.4	17.0
TR07	22	12.7	13.4	21.9	20.9	15.0	17.6
TR08	25	13.1	13.8	22.0	21.1	15.2	17.8

สมการความสัมพันธ์ระหว่างฟูรานและ DP แต่ละสมการเหมาะกับค่า DP ในช่วงที่แตกต่างกันดังนั้น การประยุกต์ใช้งานควรเลือกใช้สมการที่ให้ค่า DP ต่ำที่สุดไปคำนวณหาอายุหม้อแปลงที่เหลืออยู่ ซึ่งจะได้ค่าน้อยที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนทดแทนให้เกิดความเสี่ยงน้อยที่สุด เช่นหม้อแปลง TR01-TR04 ควรใช้ผลที่ได้จากสมการ Pahlavanpour และหม้อแปลง TR05-TR08 ควรใช้ผลที่ได้จากสมการ Chendong เป็นต้น

สรุป

จากผลการศึกษาพบว่าหม้อแปลงกำลังทุกเครื่องที่ทำการศึกษามีสภาพทางเทคนิคดีกว่าอายุการใช้งานจริงของหม้อแปลงเอง อาจเนื่องมาจากปริมาณโหลดของหม้อแปลงแต่ละเครื่องไม่สูง คืออยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 30-50 ของพิกัด ตลอดจนมีการบำรุงรักษาเชิงป้องกันอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจากที่หน่วยงานกำหนดอายุขัยของหม้อแปลงไว้ที่ 30 ปี อาจขยายเวลาการใช้งานออกไปได้เป็น 40 ปีได้ ทั้งนี้ต้องมีการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) และคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนด้านข้อมูล และทุนวิจัยทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Jahromi, A., R. Piercy, S. Cress, J. Service and W. Fan. 2009. An approach to power transformer asset management using health index. **Electrical Insulation Journal & Magazine, IEEE** 25: 20-34.

Badune, J., S. Vitolina and V. Maskalonok. 2013. Methods for Predicting Remaining Service Life of Power Transformers and Their Components. **Power and Electrical Engineering, IEEE** : 123-126.

Luiz Cheim and Donald Platts. 2012. Furan Analysis for Liquid Power Transformers. **IEEE Electrical Insulation Magazine** : 8-21.

Narottam Das, A. Abu-Siada and S. Islam. 2012. New Approach to Estimate Furan Contents Transformer Oil Using Spectroscopic Analysis. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY** 27 (2), APRIL 2012.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

Subject: Agro-Industry

ภาคบรรยาย
Oral Presentation

KASETSART UNIVERSITY

Application of Linear Programming Techniques in Porridge Development for the Elderly

Sujaree Khatcha[1], Suteera Vatthanakul[1*] and Saowanee Lertworasirikul[2]

ABSTRACT

Elderly people often have insufficient nutrients to the body's needs and risk causing various diseases, such as type 2 diabetes, osteoporosis, hypertension and the occurrence of low muscle mass (known as sarcopenia). Therefore, it is important to focus on the food intake with sufficient nutrients (protein, complex carbohydrates, dietary fiber and calcium) to the body's needs. The goal of this study was to develop a formulation of porridge using linear programming (LP) model to get a nutritious porridge (protein, fiber, calcium and sodium), suitable for the needs of the elderly bodies. When evaluating physical characteristics of porridge, the average brightness (L*), greenness (a*) and yellowness (b*) were 42.04 ± 0.02, 0.91 ±. 0.04 and 6.01 ± 0.05, respectively, with an average viscosity of 1672.50 ± 144.96 cP and a mean of firmness, consistency, adhesiveness and index of viscosity equal to 203.22 ± 21.73 g, 4513.59 ± 145.65 g.sec, -196.38 ± 7.72 g and -395.06 ± 11.76 g.sec respectively. For the sensory evaluation, the 5-point hedonic scale and just about right scale were used. It was found that most of consumers (aged 45 years and older) rated the overall liking at the "like" level (3.96) and the intensity of viscosity and salt level were at the "JAR" level. It can be said that linear programming techniques can be applied in the product development to meet the nutritional requirements.

Key words: elderly people, porridge, linear programming (LP)

* Corresponding author; e-mail address: emmesuteera@gmail.com

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

[2]Department of Product Development, Faculty of Agro Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Older people that have changed in many ways, for example, the income that is reduced due to retire from work and tend to have deteriorated in various systems in the body, such as changing tastes and being less effective in chewing and digestion, which contributes to less food intake (Chalermsri and Muangpaisan, 2017: 10-29). In addition, it is found that as the age increases the likelihood of various chronic diseases also increasing. The diseases commonly found in the elderly are sarcopenia, osteoporosis, diabetes and hypertension, which is mainly a result of inappropriate food intake, such as consuming foods that are insufficient in protein and calcium intake or consuming very salty foods. For this reason, it should be given priority to the development of nutrient products that contain nutrients that meet the needs of the elderly body at a reasonable price.

Porridge is often used to replace meals for patients and the elderly. Due to porridge has a soft texture which makes it convenient for chewing and swallowing. Some of the limitations of porridge for the elderly are low fiber content and are mostly composed of simple carbohydrates and may contain little meat protein.

Linear programming techniques are mathematical models created to describe and represent interesting problems. This technique can be applied in product development by helping to develop the product to achieve the specified objectives and use limited resources efficiently (Sheibani *et al*., 2017). Therefore, the goal of this study was to develop a formulation of porridge using linear programming (LP) model to get a nutritious porridge (protein, fiber, calcium and sodium), suitable for the needs of the elderly bodies and reasonable price.

MATERIALS AND METHODS

1. Study the basic formula of porridge for the elderly by using linear programming techniques.

Study the basic formula of porridge for the elderly by using linear programming techniques to calculate the ratio of ingredients to achieve nutritious products suitable for the needs of the elderly bodies. Start by considering the price and the amount of nutrient elements in each type of material shown in Table 1 together with the details of the amount of nutrients that the elderly should receive per meal (Table 2), the equation will be created as follows:

Objective function: The lowest production costs.

$6X1+54X2+38X3+1X4$ = minimize ……………………………………………………………….....1

Constraints

1. Protein content is greater than or equal to 25 g per serving after cooked (300 g)

   $8.3X1+90X2+20.6X3 \geq 25$……………………………………………………………………..2

2. Dietary fiber content is greater than or equal to 7 g per serving after cooked (300 g)

   $9.4X1+15.7X3 \geq 7$……………………………………………………………………………3

3. Calcium content is greater than or equal to 400 mg per serving after cooked (300 g)

   $41X1+465X2+1469X3+24X4 \geq 400$……………………………………………………..4

4. Sodium content is less than or equal to 350 mg per serving after cooked (300 g)

   $9X1+160X2+11X3+38758X4 \leq 350$……………………………………………………..5

5. Barley content is less than or equal to 35 g per serving after cooked (300 g)

   $X1 \leq 0.35$……………………………………………………………………………………6

6. Salt content is greater than or equal to 0.5 g per serving after cooked (300 g)

   $X4 \geq 0.005$…………………………………………………………………………………..7

7. The sum of all the ingredients is equal to 80 g (before cooked).

   $X1+X2+X3+X4 = 0.80$…………………………………………………………………..8

The variable X is measured in g per 100 g (g/100g) and X1 X2 X3 and X4 instead of barley, whey protein, roasted black sesame and salt, respectively.

Table 1 Nutrient information and prices of ingredients used in the production of porridge for the elderly.

Ingredients	Information per 100 g				
	Prices (baht)	Protein content (g)	Dietary fiber content (g)	Calcium content (mg)	Sodium content (mg)
Barley	6	8.3	9.4	41	9
Whey protein	54	90	0	465	160
Roasted black sesame	38	20.6	15.7	1,469	11
Salt	1	0	0	24	38,758

Source: Nutrition Division, Department of Health (2001)

Table 2 The amount of nutrients for the elderly bodies should receive per meal.

Nutrients	Nutrient content per meal
Protein (g)	≥25
Dietary fiber (g)	≥7
Calcium (mg)	≥400
Sodium (mg)	≤350

Source: Chalermsri and Muagpaisan (2017: 10-29); Yamwong (2017: 30-35)

2. **Physical characterization of porridge for the elderly**

The porridge was analyzed for color values using the Hunter Lab color meter and reported the results as brightness (L*), greenness (a*) and yellowness (b*). The texture of the porridge was analyzed by Texture Analyzer using Back Extrusion (Onyango, 2014) and the viscosity of the porridge was measured by Brookfield Viscometer.

3. **Sensory evaluation of porridge for the elderly.**

The sensory evaluations of the porridge for the elderly were carried out with the participation of 50 untrained volunteers who prepare their body on the stages of aging (aged 45 years and older) using 5-point hedonic scales (1- dislike very much, 2- dislike, 3- neither like nor dislike, 4- like, 5- like very much) to evaluate the characteristics of the product as follows: grain resolution, viscosity, color, odor, sweetness, salty, easy to swallow, softness, and overall liking. Together with the just about right test of viscosity characteristics and the salty taste of the product.

4. **Statistical analysis**

Analyze basic porridge recipes by using Lindo package version 6.1. Physical and sensory results were calculated as the mean and standard deviation. The just about right (JAR) results were analyzed using binomial test.

RESULTS AND DISCUSSION

1. **Study the basic formula of porridge for the elderly by using linear programming techniques.**

The results of analysis of the basic formula of porridge using linear programming techniques can be shown as in Table 3 and 4. It has been found that the porridge had contains 25 g of protein, 475.74 mg of calcium, 7.29 g of dietary fiber, 350 g of sodium which the value considered is in accordance with the constraints following equation 2-5. Moreover, the formula receives a minimum production cost of 21.90 Baht, when the ratio of each raw material as follows: barley 35 g, whey protein 18.72 g, roasted black sesame 25.74 g and salt 0.81 g. However, the values of chemical analysis may not be in accordance with the results from the linear software package because the nutritional value of each material is based on data from the Department of Health, which may differ from the raw materials used.

Table 3 Basic porridge formula analyzed using linear programming techniques.

Ingredients	Values (g)
Barley	35.00
Whey protein	18.72
Roasted black sesame	25.47
Salt	0.81

Table 4 Production cost and nutrient content of porridge are calculated from linear programming techniques.

Information	Values
Production cost (baht)	21.90
Protein (g)	25
Dietary fiber (g)	7.29
Calcium (mg)	475.47
Sodium (mg)	350

2. Physical characterization of porridge for the elderly.

The results of the physical characterization of porridge are presented in Table 5. Considering the color characteristics of the product, the porridge has the average brightness (L*), greenness (a*) and yellowness (b*) were 42.04 ± 0.02, 0.91 ±. 0.04 and 6.01 ± 0.05, respectively. It indicates that the porridge is developed with a somewhat dark color that is like this because it has an important ingredient as black sesame. As for the texture characteristics, it was found that the porridge developed had firmness, consistency, adhesiveness, index of viscosity and viscosity is equal to 203.22 ± 21.73 g (1.99 ± 0.21 N), 4513.59 ± 145.65 g.sec (44.26 ± 1.43 N.sec), -196.38 ± 7.72 g (1.93 ± 0.08 N), -395.06 ± 11.76 g.sec (3.87± 0.12 N.sec) and 1672.50 ± 144.96 cP, respectively. Similar results were reported by Murugkar *et al.*, 2015 who demonstrated that firmness, adhesiveness and index of viscosity of nutrient porridge were 1.048 N, 1.023 N and 2.60 N.sec, respectively. On the other hand, the developed porridge has slightly higher texture values. This may be because the porridge developed has higher protein component. The protein particles are effective against the ability of the porridge to flow makes the porridge more stable (Murugkar *et al.*, 2015).

Table 5 Physical characteristics of porridge for the elderly.

Physical characteristics	Values
Color	
L*	42.04±0.02
a*	0.91±0.04
b*	6.01±0.05
Physical characteristics	
Firmness (g)	203.22±21.73
Consistency (g.sec)	4513.59±145.65
Cohesiveness (g)	-196.38±7.72
Index of viscosity (g.sec)	-395.06±11.76
Viscosity (cP)	1672.50±144.96

3. **Sensory evaluation of porridge for the elderly.**

The sensory evaluation using the 5-point hedonic scale was showed in Table 6. The average scores of overall liking were in the level of “neither liked nor disliked” to “likes”, and when considering other sensory characteristics, it was found that the porridge had average preference scores at the “like” level. For the salty characteristics, the result showed the average score of liking at the level of “neither liked nor disliked”. The target consumer gave the lowest saltiness preference score due to the impairment of the salty taste buttons (Sergi *et al.*, 2016), which made the elderly less capable of receiving the salty taste.

Table 6 Means and standard deviation of the scores awarded by the participation to the sensory characteristics of porridge for the elderly.

Sensory characteristics	Scores
Grain resolution	4.10±1.05
Color	4.24±0.92
Viscosity	4.18±1.04
Odor	4.00±1.14
Sweetness	4.12±1.12
Salty	3.90±1.07
Softness	4.28±1.03
Easy to swallow	4.34±0.87
Overall liking	3.96±0.81

The results of the just about right test of porridge for the elderly on the viscosity, salty and easy to swallow characteristics were demonstrated in Figure 1. It was found that the target consumers feel that the porridge sample had the intensity level “JAR” level more 70% in viscosity and easy to swallow characteristics. Therefore, it can be concluded that viscosity characteristics of porridge was "just right". For the salty characteristics, it can be seen that the percentage of frequency is less than 70%, so it was still unable to conclude that "just right". It was necessary to get hold of the salty characteristics to continue with Binomial test. The results were as shown in Table 7.

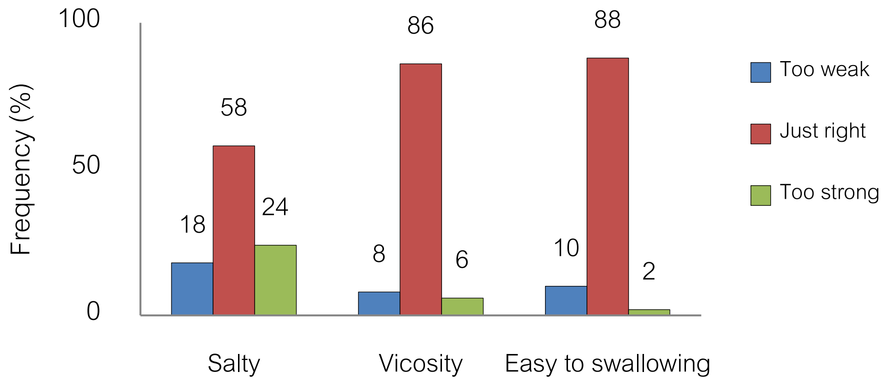


Figure 1 Just about right test of porridge in salty, viscous and easy to swallow characteristics.

The results of the binomial test of the salty characteristics were presented in Table 7. It was found that the percentage of consumers who felt that the salty taste of the porridge sample was "just right", "too weak" and "too strong" levels were 58, 18 and 24, respectively. Stone and Sidel (1993) recommended using a higher frequency (max) between " too strong" and "too weak" data in comparison with critical values at the desired confidence level, if the max is greater than or equal to the critical value, designating that the consumer feels that the characteristic of interest is at that intensity, simply if the max value is less than the critical value, then the consumer feels that the characteristic is at extinguished "just right". Hence, considering the data shown in Table 7, the max value is less than the critical value at 95% confidence level. The target consumer feels that the salty of porridge is already at the "just right" level.

Furthermore, the optimum processing for the production of porridge will be studied to help prolong the shelf life of the products for longer to develop to the industrial level.

Table 7 Binomial test of porridge in salty taste characteristics.

JAR	is JAR >70%	< JAR	> JAR	Sum	Max	0.05 critical
29	No	9	12	21	12	16

CONCLUSION

The utilization of linear programming techniques in product development can help product developers determine the basic production formulas that are suitable for their requirements or conditions quickly and efficiently. In this research, the researchers have applied linear programming techniques to determine the basic formula of porridge in order to obtain nutritious products suitable for the needs of the elderly body. In addition, when assessing the sensory evaluation, it was found that the

target consumers accepted the developed porridge, both in terms of taste and the texture by rating the preference at the "Like" level. Therefore, it is possible to develop the porridge at the industrial level due to the relatively low production cost and acceptance by consumers.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was support by the Scholarship for talent student to study graduate program in Faculty of Science and Technology Thammasat University, Contract No. TB20/2561

REFERENCES

Chalermsri, C. and W. Muangpaisan. 2017. Nutrition in the elderly, pp. 10-29. *In* Weerasak Muangpaisan, ed. **Nutritional Management in the Elderly**. Parbpim Ltd., Part, Nonthaburi.

Murugkar, D.A., P. Gulati, N. Kotwaliwale, C. Gupta and S.K.Chakraborty. 2015. Optimization of nutritionally rich instant porridge with sprouted legumes, malted millets and papaya and its comparison with conventional porridge in term of textural, rheological and particle size properties. **International Journal of Food and Nutritional Sciences** 4(1): 49-58.

Nutrition Division, Department of Health. 2001. **Nutritive Values of Thai Foods**. 1st ed. Veterans Relief Organization, Bangkok.

Onyango, C. 2014. Physical properties of dry-milled maize meals and their relationship with the texture of stiff and thin porridge. **African Journal of Food Science** 8(8): 435-443.

Sergi, G., G. Bano, S. Pizzato, N. Veronese and E. Manzato. 2016. Taste loss in the elderly: Possible implications for dietary habits. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition** 57(17): 3684–3689.

Sheibani, E., A.D. Moghaddam, A. Sharifan and Z. Afshari. 2017. Linear programming: an alternative approach for developing formulations for emergency food products. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 98(4): 1444-1452.

Stone, H. and J.L. Sidel, 1993. **Sensory Evaluation Practices**. 2nd ed. Academic Press, San Diego.

Yamwong, P. 2017. Nutrition requirement in the elderly, pp. 30-35. *In* Weerasak Muangpaisan, ed. **Nutritional Management in the Elderly**. Parbpim Ltd., Part, Nonthaburi.

Analysis of Food Safety Management System in the Frozen Seafood Manufacturing Process in PT. XYZ Indonesia

Ukhi Werdi Pratami[1*] and Thanit Puthpongsiriporn[1]

ABSTRACT

Food safety compliance is one of the key aspects of the seafood industries throughout the world. The stringent food safety requirements by the consumers, especially as an import product in the developed countries, have become a major challenge among the seafood product producers and exporters. Fisheries industries must ensure that their fish handling, processing, and transportation facilities meet the standards required. The US FDA mandates the implementation of a Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP)-based inspection system that provides food producers and processors with a standard system for carrying out and managing their activities such that the end product is safe for human consumption. PT. XYZ is one of the leading companies in the Indonesian seafood industry that produces a variety of shrimp products. This company has started its production since 1994 and acquires a HACCP certification in 1999. Analysis of Food Safety Management Systems is important to understand how the food safety standard is implemented in the frozen seafood production, as well as to identify challenges encountered by the processor. This paper presents results from in-depth interview and survey on challenges, implementation strategies, and their effectiveness conducted at PT. XYZ. Based on information detained from eight respondents from the Quality Assurance department and Factory supervisor from each processing department, it is found that the main barrier in implementing the HACCP system is in its establishment of documentation and record keeping steps. The result of this study can support other frozen seafood businesses as a guideline for the business owners or managers in applying HACCP standard.

Key words: challenges, food safety, HACCP, frozen shrimp, strategies

* Corresponding author; e-mail address: ukhi.pratami@gmail.com

[1]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Indonesia is the world's largest archipelagic country with 17,508 islands and 54,716 kilometers of coastline (FAO, 2019a). In 2017, 11.2% of Indonesian fisheries product export is frozen (Trade Map in Seafood Trading Intelligence Portal, 2018). Therefore, frozen seafood product is important and lucrative for the Indonesian fisheries sector. As stated by The WorldFish Center (2008), developing countries' future success in exporting fish depended on continued access to the markets of developed countries. One of the major challenges faced by exports of fish and fish products sector is progressively stricter food safety requirements, particularly in the EU, US, and Japan. US Food and Drug Administration (FDA) as the primary regulatory body that is responsible for regulating all aspects of consumer protection pertaining to foods and drugs including fish and seafood has some significant roles in assuring food safety. The FDA mandates the implementation of a Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP)-based inspection system that provides food producers and processors with a standard system for carrying out and managing their activities in such a way that the end product is safe for human consumption. The HACCP system has been recognized throughout the developed world as a major advance in the safety assurance system (Kanduri and Eckhardt, 2002).

HACCP is a system that identifies, evaluates, and controls hazards which are significant for food safety (FAO, 1969). There are 12 application steps of HACCP: (1) assemble HACCP team; (2) describe product; (3) identify intended use; (4) construct flow diagram; (5) confirm flow diagram on-site; (6) list all potential hazards, conduct a hazard analysis, and consider control measures; (7) determine Critical Control Points (CCP); (8) establish Critical Limits for each CCP; (9) establish monitoring system for each CCP; (10) establish corrective actions; (11) establish verification procedures; and (12) establish documentation and record keeping. Number six to twelve are the basic seven principles of HACCP (Asian Productivity Organization, 2009). However, such program has not been adopted well by every frozen seafood business operators in Indonesia due to several challenges, such as overcoming HACCP implementation's cost and embedding knowledge as well as awareness to the stakeholders.

PT. XYZ is one of the leading companies in the Indonesian seafood industry that produces a variety of shrimp products and has implemented HACCP for more than 15 years. The products of PT. XYZ have been distributed into some countries such as Japan, China, UK, Netherland, France, and USA. Some of the products are Head Less (HL), Tailed, Peeled-Deveining (PD), and Nobashi Ebi (NE).

Analysis of Food Safety Management System is important to understand how the food safety standard is implemented in the frozen seafood production, analyzing the problems, challenges, as well as strategies of the implementation during the manufacturing process, and evaluate the effectiveness of those strategies identified. Analysis of HACCP implementation in PT. XYZ has been conducted and the result of this study can be used as the basis of establishing strategies in the Food Safety Management implementation and a guideline for the development of frozen seafood production business owners or managers.

MATERIALS AND METHOD

This research is carried out by a survey method. The main aim of conducting a survey is to draw reliable and valid data in a structured questionnaire that will be easy to analyze and report (Showkat, 2017). The survey is conducted in the PT. XYZ as a producer of frozen seafood in Indonesia. Data collection is done by direct observation. Questionnaires are used as a guideline in drawing conclusion. Observation is done for a month in PT. XYZ. Questionnaires are developed based on the situation there, such as the strategies found and the organization chart to know who are able to be interviewed). There are two types of questionnaire, first is Questionnaire for the supervisor and Quality

Control that is about the HACCP implementation in the production line and the second one is for the Quality Assurance that is about the twelve steps of HACCP implementation and the whole problems and challenges. In-depth interview is carried based on food safety standard used by the manufacturer. Then, the result is analyzed descriptively.

In this study, the food safety standard analyzed is based on Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP). The framework of the research is depicted in Figure 1. During the twelve application steps of HACCP in the frozen seafood manufacturing process, until it is consumed by the consumers safely, there are problems and challenges need to be conquered. Therefore, effective strategies along the production are needed. The challenges faced and the way the frozen seafood manufacturer solves the problems of food safety management are observed. A total of 38 companies manufacturing seafood product has been asked for being observed, but PT. XYZ is the one who agreed on this occasion. The observation is supported by eight respondents that consist of the supervisor from each department in the production line, Quality Control, and Quality Assurance of the factory. The answers given are on a Likert Scale of 1 to 5 that consecutively stands for, “very ineffective”, “ineffective”, “less effective”, “effective”, and “very effective”. Along the production line, the score is dragged by the observer based on the answer given by the supervisor and Quality Control since during the production, they can’t fill out the questionnaire due to their work. Meanwhile, for the Quality Assurance, the score is written by himself. The score represents the effectiveness of the strategies implemented in HACCP implementation.

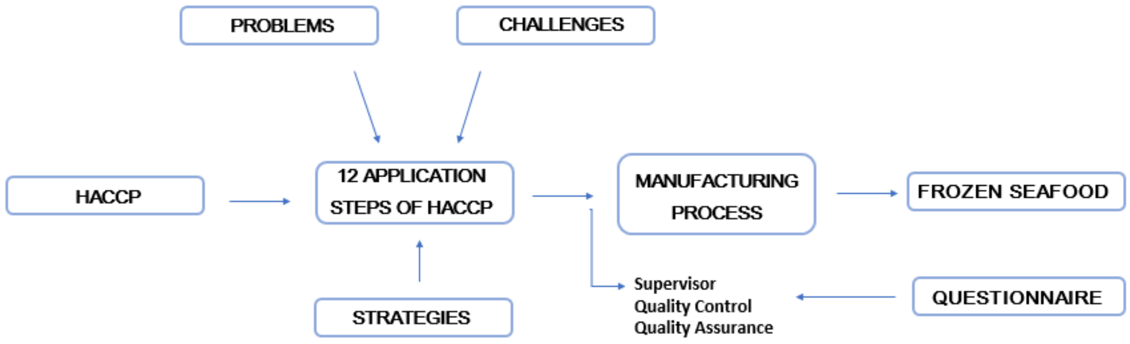


Figure 1 Food safety management system research framework.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Implementation of HACCP in PT. XYZ

PT. XYZ has applied all of the twelve implementation steps of HACCP. HACCP team consists of (1) Factory Manager, (2) Quality Control and Quality Assurance Manager, (3) Purchasing Manager, (4) Production Manager, (5) Quality Control (QC) staff, (6) Quality Assurance (QA) staff, and (7) Chief of Laboratory. During the observation, product that was produced continuously was NE product, i.e. Stretched (Belly Cut) or Nobashi Ebi shrimp. Therefore, the study will focus on the NE product.

The raw material of the product is Vannamei (Litopenaeus vannamei) that is supplied from the semi-intensive brackish water cultivation from some areas on the north side of Java Island. For the twelve steps of HACCP implementation, identification of intended use of products is done by HACCP team to identify shelf life of materials and product, modify direction of usage (to make sure the consistency of usage direction with its real usage), ensure direction of labelling is consistent with the rules, and ensure products’ usage condition. The production steps of Nobashi Ebi product consist of (1) receiving Head On (H/O) shrimp fresh, (2) selection, (3) washing I, (4) de-heading, (5) washing II, (6) sizing by grading and correction, (7) Weighing HL, (8) peeling tail on and deveining, (9) checking foreign material in backlight table, (10) washing III, (11) cutting belly, (12) stretching, (13) soaking, (14)

layering, (15) vacuum, (16) freezing, (17) metal detecting, (18) packing and labeling, (19) cold storage, and (20) stuffing. Among all those steps, the Critical Control Points (CCP) take place in the receiving, metal detecting, and cold storage. Hazards along the production of the frozen shrimp are divided in to three types, i.e. physical hazard (filth or foreign material, such as hair, glass, leaves, etc.), biological hazard (pathogenic bacteria growth, such as E. coli, Salmonella and Vibrio parahaemolyticus that can be originated from the lack of cold chain implementation, equipment and/or worker contamination, or undiscarded vein), and chemical hazard (chlorine or antibiotic residues, such as Chloramphenicol, Nitrofuran and Tetracycline). Hazards can be controlled by Good Manufacturing Practice (GMP) and Sanitation Standard Operating Procedure (SSOP). In the raw material receiving, chemical hazard gives a high severity level and in the metal detecting, the physical hazard gives a high severity level because of the availability of metal fragment. In the cold storage, biological hazard gives a moderate severity level for the consumers. Critical limits are decided by the HACCP team based on the buyers' demand and government rules.

2. HACCP Implementation Effectiveness, Problems, Challenges, and Strategies

The result shows that in Receiving, Cold Storage, Thawing, Selection, and Washing I, 59% of answers represent the strategies to comply HACCP standard in those processes are considered as "effective". 38% of them is considered as "very effective", and the rest is categorized as "less effective". The problem during receiving is found when the size of the shrimp supply is uneven. In this case, the coordination with the production manager is needed. Meanwhile, in De-heading and Washing II process, 75% of answers are categorized as "effective". The problems in these steps are when the de-heading result is under the minimum percentage (65%). Therefore, teamwork between de-heading and cold storage department to analyze the root problems is required. The other problem is not frequently happened, but if the de-heading conveyor is off, then technician support is needed.

The other questionnaire consists of Sizing by Grading and Correction, Keeping Ice, and Washing III steps. There are 53% of answers categorized as "effective" and the rest is categorized as "very effective". The problem that sometimes appears here is the human error so that the grading box is left empty. Therefore, the works need to be supervised well. For Peeling Tail, Deveining, Checking Foreign Material on Backlight Table, and Washing IV, 69% of answers are "effective" and the rest is "very effective". The problem appears here is the low quality of defrosted raw material imported from the outside of the company. Hence, the correction needs to be more strict than usual.

Different from the steps before, Soaking, Freezing, Weighing I, Glazing, and Weighing II processes are categorized as "very effective" (74% of answers). The most effective is during the process of Weighing and Labelling and Freezing. The problem found here is where there are broken shrimps. The strategy applied is making the broken shrimps to be block products. The next questionnaire (Questionnaire 6) comprises of Packing Bag, Sealing, and Metal Detecting where metal detecting is included as one of Critical Control Point (CCP). 95% of answers shows that the strategies here are "very effective", as for the metal detection, strategies applied are internal validation before use, external validation once a year, accuracy checking, and corrective measurement. The last steps are Storage Warehouse, Checking, Packaging and Labelling, Cold Storage, and Stuffing that shows 80% of the result are "very effective" and the rest is "effective". Cold storage is also considered as a CCP since its strategies are done to prevent a biological hazard. Those strategies are maintaining the room temperature to be less than or equal to -18°C, QC checking twice each day, doing product inspections, laboratory test towards three pieces of product samples, and doing re-test for its corrective measurement.

The last questionnaire given to the Quality Assurance consists of two parts. The first part is about the overall problems and strategies and the second part is about challenges and strategies from

each step in the twelve application steps of HACCP (Table 1) as well as the whole problems and challenges. From the first part, the first problem may be found in the implementation of HACCP is a shortage of HACCP knowledge, expertise, and experience. Strategies taken by the Company are overall “very effective”. Training about HACCP has been well scheduled followed by post-tests and retraining when it is needed. The training is done every two weeks per area of production. The conformity of HACCP implementation itself will be inspected directly by QA or QC. One strategy that has not been applied is E-learning implementation as it is stated by Rostron (2012) that E-learning should be promoted to improve accessibility.

Table 1 Twelve steps of HACCP implementation, challenges, and strategies of PT. XYZ.

Step	Description	Challenges	Score	Strategies
1	Assemble HACCP team	• Acquire enough team members with appropriate HACCP understanding • Improving knowledge, expertise, and experience in HACCP for trainers, consultants, enforcers, and policymakers	5	• Establish team from various departments or component of the company • Employ enough training to educate staff
2	Describe product	Include essential information about the product completely	5	Product description is done by HACCP team, consists of raw material, raw material origin, raw material receiving, product, processing steps Freezing, packing, storage, storability, labelling, direction of usage, and market
3	Identify intended use	• Make sure that all customers' requirements met by the HACCP implementation effort • Perfectly prevent wrong usage	4	• Usage plan identification by HACCP team • Ensure the consistency of the direction and the real usage • Ensure that the labelling direction is in line with the regulation • Evaluate and modify usage direction when it is needed
4	Construct flow diagram	Production process must be altered due to raw material quality fluctuation, Master Carton breakdown, customers' specific requirement, etc.	4	Construct an efficient flow diagram (clear, accurate, and detail) that can represent the whole process of production from the raw material receiving until the finished goods loaded into export container

Table 1 (Continued)

Step	Description	Challenges	Score	Strategies
5	Confirm flow diagram on-site	The process of production can be in line with the rules and regulation	4	• confirm the production operation in all stages, operation, and working hours based on HACCP manual • make changes to the flow diagram if it is needed
6	List all potential hazards, conduct a hazard analysis, and consider control measures	Prevent physical, biological, as well as chemical hazards by preventing contaminations	5	• Source of contaminants treatment (good raw materials handling, maintaining facilities and equipment, appropriate production procedures and employee or workers practices) • GMP and SSOP application
7	Determine Critical Control Points (CCP)	Eliminate the effect of significant hazards	5	Decision tree analysis to the all of significant hazards to make sure whether the hazard is categorized as CCP or non CCP
8	Establish Critical Limits for each CCP	Producing finished goods which are safe to consume	5	Critical limits are decided by HACCP team based on the buyers' demand, government rules, and test results
9	Establish monitoring system for each CCP	Make sure that critical limit is not violated (not exceed its tolerance limit)	5	Monitoring scope comprises of what, when (frequency), where, who, and how
10	Establish corrective actions	Prevent contamination effectively	4	• Correction by QC • Rejection • Reworking • Reparation of machine (for metal detector and cold storage) • Re-adjusting for cold storage
11	Establish verification procedures	Applying audit and verification method including residues or antibiotic test	5	• QC verification • External laboratory cooperation
12	Establish documentation and record keeping	Construct documentation and record keeping with good human resources	4	• Periodical training and education • Embedding motivation to the staff • Establishing good communication between staff

The other problem may appear is cost/benefit that is hard to be calculated. The strategy in overcoming this problem is by improving the efficiency in HACCP implementation costs along the production process. This strategy is considered “effective” as it is proven by training that is held by the company to make sure that the implementation of HACCP is done effectively and efficiently. This problem may also correspond with the problem of complexity and inefficiency of time since the more complex and more inefficient processes may lead to a higher cost. A software and/or ERP system are suggested to be introduced and applied as automation. The score in this strategy is three since this has not applied in the company yet, therefore, in this case, it is considered as neutral.

Better coordination and communication across Government authorities and businesses, the engagement between Government and the other stakeholders, and advisory role for inspectors are considered as “effective” strategies in the poor government structure for food control problems. As the interviewee stated that so far there is no significant problem with the Government’s control in food safety for the company. However, communication between Industry or Company with its stakeholders itself has been considered as “very effective”. Therefore, the interviewee did not state that there is a lack of national HACCP strategy, as HACCP system and guidance are mandated by Government through Indonesian National Standard (SNI 01-4852-1998). The implementation of HACCP in the company has been well-supported by the provision of guidance and information about the HACCP practice. Hence, it is classified as “very effective”. Moreover, based on General Principles of Food Hygiene CAC/RCP 1-1969, in the application of HACCP system, flexibility appropriate to the business is important. This flexibility should take into account the nature and size of the operation, including the human and financial resources, infrastructure, processes, knowledge, and practical constraints. In PT. XYZ, infrastructure and periodical checking have been done periodically and it has been considered as “effective”. Furthermore, Standard Operating Procedure (SOP) has been applied “very effectively” along the production process as a strategy in complying national HACCP requirement. Additionally, the low raw material quality problem is “effectively” controlled by the use of chlorine. However, the use of chlorine needs to be managed or controlled as it written by FAO (2019b) that controlling the residual of chlorine or other approved water treatment chemical in container cooling water is needed by measuring and recording it.

The effectiveness of HACCP implementation in PT. XYZ is overall categorized as “very effective”. Nevertheless, there are challenges faced by the company in terms of HACCP implementation. The twelve steps of HACCP implementation, as well as challenges and strategies in HACCP application of PT. XYZ generated from the second part of questionnaire given to the Quality Assurance are written in Table 1. Identifying intended use, Constructing flow diagram and Confirming on site, Establishing corrective actions, and Establishing documentation and record keeping are considered as the challenging steps compared to the others as how it is said by the respondent and becomes a barrier in the HACCP implementation. It is because of those steps need to be thoroughly done by expert with enough knowledge and experience. On the other hand, every people have different level of responsibilities that becomes a barrier especially for documentation and record keeping establishment. The low quality of the human factor may affect the effectiveness of HACCP system application. Therefore, behavioral changes are needed for the HACCP implementation to succeed. Embedding motivation to the staff and doing better communication with them so that the staff can be more persistent in doing their responsibilities may become a challenge.

CONCLUSION

Implementation of HACCP in PT. XYZ has complied all of the twelve steps of HACCP. The challenging steps are “identify intended use”, “construct flow diagram”, “confirm flow diagram on site”,

“establish corrective actions”, and “establish documentation and record keeping”. Compared to the other steps in the production line, based on questionnaire given, “selection” step has the highest percentage of score. Therefore, it has the highest effectiveness of strategies application. The effectiveness of HACCP strategies implementation in PT. XYZ is overall categorized as “very effective”. Implementation of automation by Enterprise Resource Planning (ERP) system is suggested to reduce the complexity and inefficiency of time in the company. The worker understanding is also an important factor. Hence, the company needs to overcome the challenges of embedding motivation for the staff to fulfill their responsibilities, doing better communication with them, as well as ensuring staff and management commitment to be able to implement HACCP or food safety management system effectively.

ACKNOWLEDGMENT

My gratitude for Department of Agro-Industrial Technology, and Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University in supporting me for this paper.

REFERENCES

Asian Productivity Organization. 2009. **Food Safety Management Manual**. Takeda Printing, Tokyo.

FAO. 1969. **Appendix I: Definition of Terms, Based on Codex Alimentarius: HACCP System and Guidelines for its Application; Annex to CAC/RCP-1 (1969), Rev.3 (1997)** (Online). http://www.fao.org/3/Y1390E/y1390e0d.htm, February 24, 2019.

FAO. 2019a. **Fishery and Aquaculture Country Profiles, The Republic of Indonesia.** FAO Fisheries and Aquaculture Department.

FAO. 2019b. **Fish and Fishery Products Hazards and Controls Guidance.** Fourth Edition. Florida Sea Grant. Gainesville.

General Principle of Food Hygiene CAC/RCP 1-1969. 1969. **General Principles of Food Hygiene** (Online). https://www.loex.de/files/downloads/lebensmittel/Codex%20Alimentarius%20(EN).pdf. October 27, 2019.

Kanduri, L. and R.A. Eckhardt. 2002. **Food Safety in Shrimp Processing. A handbook for Shrimp Processors, Importers, Exporters and Retailers.** Blackwell Publishing, Oxford.

Rostron, K.I. 2012. **Strategies, Challenges and Outcomes in the Development and Implementation of Food Control Systems: An International Perspective from Policy Makers.** Thesis. University of Salford.

Seafood Trading Intelligence Portal. 2018. **Indonesia's Seafood Sector** (Online). https://seafood-tip.com/sourcing-intelligence/countries/indonesia/. November 7, 2019.

Showkat, N. 2017. **Quantitative Methods: Survey** (Online). https://www.researchgate.net/publication/318959206_Quantitative_Methods_Survey, February 28, 2019.

The WorldFish Center. 2008. **Food Safety Standards and Regulations: Implications for Asian Fish Exporters.** The WorldFish Center, Penang.

Antibacterial Activity and Foaming Ability of Selected Surfactants

Suchawadee Loyawattananan[1] and Chitsiri Rachtanapun[1,2*]

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the antimicrobial activity and foaming ability of selected commercial surfactants. Seven commercial surfactants including cocamidopropyl betaine, coco glucoside, lauryl glucoside, sodium lauroamphoacetate, sodium cocoyl isethionate, sodium lauroyl glutamate and disodium laureth sulfosuccinate were selected. Antimicrobial activity was determined by agar well diffusion assay. Gram-positive and Gram-negative bacteria namely *Listeria monocytogenes*, *Listeria innocua, Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* were used as target microorganisms in the food contact surface and environment of a food manufacturing facility to prevent cross contamination of the finished products. Foaming ability was tested by the Bartsch test. The results showed that the cocamidopropyl betaine was the strongest antibacterial surfactant, it inhibited all bacterial strains with a diameter of inhibition zone ranged from 16.5 to 19.6 mm. For foaming ability and pH, coco glucoside showed the highest foam-forming efficiency at 2.5% w/w with pH 8.74 as 48 mL. On the basis of obtained results, antibacterial activity and foaming ability show the potential of selected surfactants to be used as an antibacterial surfactant against foodborne pathogenic bacteria in household and food manufacturers.

Key words: Surfactant, Antimicrobial activity, Foaming ability, Agar well diffusion assay

* Corresponding author; e-mail address: chitsiri.t@ku.th

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Center for Advanced Studies Agriculture and Food, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Surfactants are used in our daily life as a detergent, cleaning agent, soap or shampoo. Mostly, food factories use a synthetic surfactant, but there are some adverse effects after use, for example, corrosion of equipment, skin irritation and toxic to the environment (Pradhan and Bhattacharyya, 2017). Quaternary Ammonium Compounds (Quats) are a surfactant cleaning chemical having antimicrobial activity and also called as a sanitizer. Quats are widely used in the food factory to handle the cleanliness in couples with the sanitized condition of a food manufacturing facility to prevent cross-contamination of the finished products from the environment. However, there are many reducing synthetic surfactant campaign in Europe; Quats were being considered by some companies as possible safe replacements for these agents (Mcrae, 2017). An alternative antimicrobial surfactant, which is more gentle, non-irritating and friendly to the environment, has been investigated for replacing synthetic surfactants. Some researchers described the qualification of a surfactant such as foaming ability, foaming stability, emulsification, viscosity, surface tension and biodegradation (Pradhan and Bhattacharyya, 2017; Muhammad and Khan, 2018). However, the study on their antimicrobial activities is still lacking.

The objective of this research is to study the potential of seven selected surfactants in the market for their antibacterial activity and foaming ability, in order to discover an alternative antibacterial surfactant for application in household and food factories.

MATERIALS AND METHODS

1. Microbiological media

Tryptone soya broth (TSB; Merck, Darmstadt, Germany) was used for bacterial culture activating. Tryptone soya agar (TSA) was used for bacteria counting. Mueller Hinton agar (MHA; Difco, Becton, Dickinson and Company, USA) was used for agar well diffusion assay to test the antibacterial activity of each selected surfactant by preparing 30 mL of MHA for each plate (Modified from Inalegwu and Sodipo, 2015). For *Listeria* spp., the media added with 0.6% yeast extract (YE; Difco) were used.

2. Preparation of surfactants

Selected surfactants namely cocamidopropyl betaine (CB), coco glucoside (CG), lauryl glucoside (LG), sodium lauroamphoacetate (SL), sodium cocoyl isethionate (SC), sodium lauroyl glutamate (SG) and disodium laureth sulfosuccinate (DL) were purchased from Cosmetic Ingredients Supplier, Chanjao Longevity Co., Ltd. Bangkok, Thailand. Surfactant solution was prepared by weighing 5 g of surfactant and gently added deionized water until 50 g by analytical balance for 10% w/w in the beaker as a stock solution for foaming ability and pH measurement. The same method was used to prepare 0.5, 1.25, 2.5, 5, 10, 25 and 50% w/w surfactant solution and only up to 25% w/w for lauryl glucoside, sodium cocoyl isethionate and sodium lauroyl glutamate since they are more viscous

and harder to dissolve. The appearance of surfactant solution, Cocamidopropyl betaine, was shown in Figure 1.

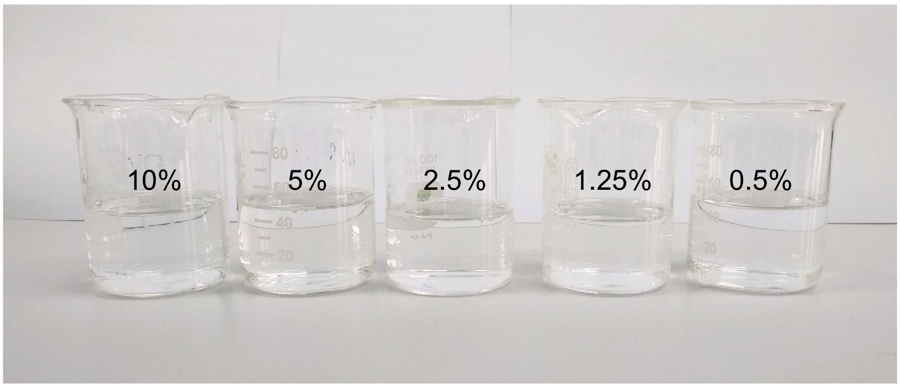


Figure 1 Cocamidopropyl betaine in different concentration (%, w/w).

3. Bacterial culture preparation

Listeria monocytogenes Scott A was obtained from the Laboratory of Microbial Food Safety, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University*. Listeria innocua* 9011 was obtained from the Department of Medical Sciences, Thailand. *Staphylococcus aureus* 746 and *Escherichia coli* 780 were obtained from the Thailand Institute of Scientific and Technological Research Culture Collection, Pathum Thani, Thailand.

One loop-full of bacterial strain was first inoculated in a tube containing 5 mL TSB before incubating at 37 °C for 24 h. Then transferred another two subsequent in fresh TSB before using as a broth culture. Number of cells in the inoculum was enumerated by spreading plate on TSA.

4. Antibacterial activity assay of the selected surfactants

The broth culture was diluted in 0.1% peptone (Merck, Darmstadt, Germany) to obtain 8 Log CFU/mL, and swabbed to a MHA plate with a sterile cotton swab, and then make four or five holes of 6 mm in diameter by using a cork borer (Modified from Holder and Boyce, 1994). Then, 50 μg of each selected surfactant at a desired concentration was added into each hole. Likewise, deionized water was used as a negative control. The plate was left for an hour to let the surfactant diffused, after that placed the plates upside down and incubated at 37 °C for 24 h. The clear zones or zone of inhibition were measured using Vernier caliper, 3 times for each clear zone. The three replications were conducted.

5. Foaming ability and pH measurement

Foaming ability was studied by Bartsch test, 40 mL of surfactant solution was vigorously shaken by hand in a 100 mL graduated cylinder and measured the foam volume. The shaking was performed at approximately 3 Hz with amplitude 5 cm for 40 sec using a stopwatch (Modified from

Pradhan and Bhattacharyya, 2017). pH was measured 3 times at room temperature using pH meter (Model Lab 850, Schott SI Analytics, Germany).

6. Statistical analysis

The data were subjected to analysis of variance (ANOVA), using the general linear model procedure of the SPSS statistical package (SPSS® version 25.0). Duncan tests were used to compare means. All differences are reported at a significance level of 95%.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Antibacterial activity of the selected surfactants

The antibacterial activity of the selected surfactants against four strains of bacteria is shown in Table 1.

Table 1 Inhibition zone of selected surfactants.

Surfactant	Conc. (% w/w)	Inhibition zone (mm) *			
		L. monocytogenes	*L. innocua*	*S. aureus*	*E. coli*
DI water	-	-	-	-	-
Cocamidopropyl betaine (CB)	25	19.6 ± 0.67 ^{Ab}	18.8 ± 1.34 ^{ABb}	17.5 ± 1.24 ^{Bab}	18.3 ± 0.83 ^{ABa}
	50	19.5 ± 0.7 ^{Ab}	18.4 ± 0.87 ^{Ab}	16.5 ± 1.13 ^{Bb}	17.8 ± 1.48 ^{Aba}
Disodium laureth sulfosuccinate (DL)	25	-	-	15.4 ± 1.24 ^{Bb}	17.7 ± 0.71 ^{Aa}
	50	-	-	15.1 ± 1.34 ^{Bb}	19.3 ± 0.73 ^{Aa}
Sodium lauroamphoacetate (SL)	25	14.7 ± 0.71 ^{Bc}	17.4 ± 1.72 ^{Ad}	-	-
	50	15.4 ± 1.32 ^{Bc}	17.8 ± 1.56 ^{A}b	-	-
Coco glucoside (CG)	25	19.2 ± 1.05 ^{Bb}	24.2 ± 1.03 ^{Aa}	13.5 ± 1.37 ^{Cbc}	-
	50	22.2 ± 1.72 ^{Ba}	25.4 ± 1.85 ^{A}a	16.0 ± 0.77 ^{Cb}	-
Lauryl glucoside (LG)	25	14.7 ± 2.67 ^{Ac}	14.9 ± 2.06 ^{Ab}	12.1 ± 3.90 ^{Ac}	-
Sodium cocoyl isethionate (SC)	25	18.6 ± 0.97 Ab	18.3 ± 6.28 Bb	17.6 ± 0.65 Cab	-
Sodium lauroyl glutamate (SG)	25	22.4 ± 2.15 Aa	18.3 ± 1.09 Bb	19.6 ± 1.93 Ba	-

* Values are the mean of three replications.

A-C means within the same row followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$)

a-b means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$)

– means not active (diameter of well = 6 mm)

Among tested surfactants, CB showed the greatest efficiency to inhibit all tested bacteria. The result showed that CG, LG, SC and SG had the ability to inhibit Gram-positive bacteria, *L. monocytogenes, L. innocua* and *S. aureus*, but not inhibit Gram-negative bacteria such as *E. coli*. Furthermore, the response of Gram-positive bacteria against the surfactant was varied and dependent on the type of surfactants. For example, DL inhibited *S. aureus*, but not inhibit *L. monocytogenes* and *L. innocua*.

Comparing among tested bacteria, *E. coli* as a representative of Gram-negative bacteria was resistant to the surfactant than other Gram-positive bacteria. These results can be described by a more complicated structure of the cell wall of Gram-negative bacteria than Gram-positive bacteria. Gram-negative bacteria have an outer membrane, comprising of phospholipids bilayer and lipopolysaccharides (LPS), covering peptidoglycan. While Gram-positive bacteria have only the thicker peptidoglycan layer but lack the outer membrane structure. The LPS prevents the penetration of surfactant molecules with hydrophobic properties, causing more difficult to enter the cell membrane (Salton and Kim, 1996).

When the concentration of surfactant increased, the inhibition zone was significantly wider ($p \leq 0.05$) in only CG against *L. monocytogenes*. Increasing the surfactant concentration was not a significant effect on greater inhibition of bacteria in other conditions ($p > 0.05$). The results showed a wider inhibition zone at a lower concentration of CB. It could explain that CB is an amphoteric surfactant which has a negative charge on their hydrophilic end. At higher concentrations, the negative charge of CB strongly repulsed negative charge of the bacterial cell wall, therefore CB cannot attack bacteria well (Johansson and Somasundaran, 2007; Silhavy *et al*., 2010).

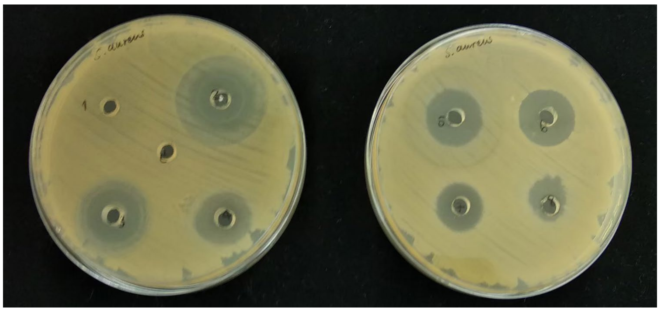


Figure 2 Inhibition zone of seven selected surfactants against *Staphylococcus aureus.*

2. Foaming ability of the surfactants

Although foam-forming is an important parameter of surfactant, more foam is not related to the efficiency of cleaning but related to consumer acceptance (Pradhan and Bhattacharyya, 2017). Evaluation of foaming ability helps to select the optimum concentration for usage. Foaming ability can

be measured by the foam volume after vigorous shaking, the results of foaming volume are shown in Table 2.

Table 2 Foam volume (mL) of selected surfactants.

Surfactant	Concentration (% w/w) *				
	0.5	1.25	2.5	5	10
CB	19 ± 2.83 ^{Da}	23 ± 0.71 ^{Ca}	15 ± 1.41 ^{Da}	18 ± 5.30B ^{Ca}	18 ± 4.60 ^{BCa}
DL	39 ± 3.54 ^{Aa}	41 ± 2.83 ^{Aa}	31 ± 3.54 ^{Bb}	17 ± 0.71 ^{Cc}	12 ± 1.41 ^{Cc}
SL	29 ± 2.12 ^{BCa}	21 ± 1.41 ^{Ca}	25 ± 7.07 ^{BCa}	29 ± 0.35 ^{ABa}	12 ± 1.41 ^{Cb}
CG	19 ± 0.71 ^{Dd}	24 ± 1.41 ^{BCc}	48 ± 2.83 ^{Aa}	34 ± 2.83 ^{Ab}	33 ± 0.71 ^{Ab}
LG	24 ± 0.71 ^{CDa}	19 ± 1.06 ^{Cb}	20 ± 0.71 ^{CDb}	25 ± 1.41 ^{ABCa}	25 ± 0.71 ^{ABa}
SC	34 ± 4.95 ^{ABa}	29 ± 3.54 ^{Bab}	31 ± 1.41 ^{Bab}	23 ± 10.61 ^{ABCab}	15 ± 6.36 ^{Cb}
SG	5 ± 1.41 ^{Ec}	21 ± 2.12 ^{Cb}	26 ± 7.07B ^{Cab}	32 ± 0.35 ^{Aa}	25 ± 4.24 ^{ABab}

* Values are the mean of two replications

A-C means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$)

a-b means within the same row followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$)

The results showed that the foaming ability did not depend on concentration increasing. Among all tested conditions, 2.5% w/w CG gave the highest foam volume. The foaming volume of CB was not significant difference ($p > 0.05$) upon increasing concentrations. However, increasing the concentration of DL, SL and SC could significantly increase foam volume ($p \leq 0.05$). LG at 0.5, 5 and 10% w/w showed the same foam volume, SG at 5% w/w showed the most foam volume in concentration comparing (Table 2). However, the foaming ability of each surfactant was not related to concentration increasing.

3. pH of the surfactants

Measurement of pH may help to explain foaming ability and shows the acid-base trend of concentration that can apply for suitable cleaning work. The results as shown in the Table 3 can categories the surfactant into two groups including acid surfactant and base surfactant (Weise, 2003). Therefore, CB, DL, SC and SG were acid surfactants, whereas SL, CG and LG were base surfactants. From overall results, slightly acid surfactants (pH 5-6) such as DL and SG can be used as an alternative antibacterial surfactant in household and food industries due to the near neutral pH and non-corrosive (Weise, 2003). Strong acidic antimicrobial surfactants such as CB and SC have the potential to use in CIP (clean-in-place) units in the food industry. In addition, the base surfactant with an antilisterial effect like SL may have potential to be applied to the dairy industry due to protein dissolving and inhibition effect of *L. monocytogenes* and *L. innocua* which plays a major role in the dairy industry. Further

application in ready-to-eat (RTE) high protein products such as RTE sausage should be investigated as well. For strong base antimicrobial, CG can be used as a dirty wall and greasy floors cleaning agent. However, this research is a preliminary study. Further studying on bacteria in a wide range, a side effect of usage and testing antimicrobial to food contact surface are needed to be investigated.

Table 3 pH of selected surfactants.

Surfactant	Concentration (%w/w) *				
	0.5	1.25	2.5	5	10
CB	4.96 ± 0.02 ^{Fa}	4.87 ± 0.02 ^{Ec}	4.90 ± 0.01 ^{Ebc}	4.93 ± 0.01 ^{Eab}	4.98 ± 0.01 ^{Ea}
DL	5.73 ± 0.01 ^{Dd}	5.88 ± 0.01 ^{Cb}	5.92 ± 0.02 ^{Ca}	5.82 ± 0.01 ^{Dc}	5.68 ± 0.02 ^{De}
SL	8.94 ± 0.09 ^{Bc}	9.43 ± 0.04 ^{Ab}	9.59 ± 0.00 ^{Aa}	9.55 ± b0.01 ^{Aa}	9.42 ±0.01 ^{Ab}
CG	7.62 ± 0.01 ^{Ca}	8.12 ± 0.01 ^{Bb}	8.53 ± 0.04 ^{Bc}	8.79 ± 0.01 ^{Bd}	8.86 ± 0.01 ^{Be}
LG	9.53 ± 0.03 ^{Aa}	9.89 ± 0.04 ^{Bb}	10.13 ± 0.07 ^{Bc}	10.53 ± 0.03 ^{Bd}	10.45 ± 0.10 ^{Be}
SC	4.63 ± 0.02 ^{Eab}	4.60 ± 0.00 ^{Fabc}	4.59 ± 0.00 ^{Fbc}	4.56 ± 0.02 ^{Ec}	4.65 ± 0.04 ^{Fa}
SG	5.23 ± 0.02 ^{Da}	5.39 ± 0.01 ^{Db}	5.74 ± 0.02 ^{Dc}	6.13 ± 0.01 ^{Cd}	6.44 ± 0.01 ^{Ce}

* Values are the mean of two replications

A-F Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$)

a-e Means within the same row followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$)

CONCLUSION

Selected surfactants presented a good potential in both antibacterial activity and foaming ability. It can be categorized into three group including (1) the strong acidic antibacterial surfactant such as CB which showed the strong acidic properties and ability to inhibit all tested bacteria; (2) Slight acid surfactant (pH 5-6) such as DL and SG; and (3) base surfactant with an antilisterial activity like SL. This research provides new information and can be applied for developing detergent and sanitizer in household and food manufacturers for the future.

REFERENCES

Holder, I.A. and S.T. Boyce. 1994. Agar well diffusion assay testing of bacterial susceptibility to various antimicrobials in concentrations non-toxic for human cells in culture. **Burns** 20(5): 426-429.

Inalegwu, B. and O.A. Sodipo. 2015. Antimicrobial and foam-forming activities of extracts and purified saponins of leaves of *Tephrosia vogelii*. **European Journal of Experimental Biology** 5(5): 49-53.

Johansson, I. and P. Somasundaran. 2007. **Handbook for Cleaning/Decontamination of Surfaces**. Elsevier, Amsterdam; Boston.

Maatalah, M.B., N.K. Bouzidi, S. Bellahouel, B. Merah, Z. Fortas, R. Soulimani, S. Saidi and A. Derdour. 2012. Antimicrobial activity of the alkaloids and saponin. **Journal of Biotechnology and Pharmaceutical Research** 3(3): 54-57.

Mcrae, M. 2017. **This Common Ingredient in Antiseptic Soap is Messing with your Cell Biology** (Online). https://www.sciencealert.com/this-common-household-antiseptic-will-drain-your-cells-batteries, November 15, 2019.

Muhammad, M.T. and M.N. Khan. 2018. Eco-friendly, biodegradable natural surfactant (*Acacia concinna*): An alternative to the synthetic surfactants. **Journal of Cleaner Production** 188: 678-685.

Pradhan, A and A. Bhattacharyya. 2017. Quest for an eco-friendly alternative surfactant: Surface and foam characteristics of natural surfactants. **Journal of Cleaner Production** 150: 127-137.

Salton, M.R.J. and K.S. Kim. 1996. **Medical Microbiology, 4th edition** (Online). https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK8477/, November 26, 2019

Silhavy, T.J., D. Kahne and S. Walker. 2010. The bacterial cell envelope. **Cold Spring Harbor Perspectives in Biology** 2(5): 1-16.

Weise, G. 2003. **A Basic 'Chemistry 101' Primer on Using Today's Advanced Cleaners** (Online). https://www.cleanlink.com/hs/article/PhD-in-Detergent-pHbrhr-noshade-width50-alignleftA-Basic-Chemistry-101-Primer-on-Using-Todays-Advanced-Cleaners--786, November 26, 2019.

Effect of Different Rice Flours and Milk Types on Physical and Sensory Properties of Rice Pudding

Le Ngoc Phuong Uyen[1] and Wannasawat Ratphitagsanti[1*]

ABSTRACT

Rice pudding is commercialized nowadays to an increasing extent not only it can be made easily but also it has long been associated with good nutrition and easy digestion. Since Thailand has a strong tradition of rice production – a main ingredient for rice pudding, it is potential to develop rice pudding as a healthy dessert for consumers. Rice pudding was prepared by thermal processing using different rice flours (Prachinburi 2, Jasmine and Riceberry) and milk types (cow milk and soybean milk) then the physical and sensory properties of rice pudding were studied. The results showed that the color of rice puddings was highly affected by variety of rice flour and milk type. Furthermore, the incorporation between Prachinburi 2 rice flour and cow milk could create rice pudding with the lowest syneresis index (4.78±0.17) after 28 days when storage at 4°C compared to other recipes. Sensory evaluation results revealed that the pudding from Prachinburi 2 rice flour and cow milk were preferred by 50 untrained panelists with the highest liking mean scores on all attributes. However, other rice pudding recipes were also accepted at "like moderately" level. It is necessary to investigate the shelf-life stability of rice pudding with acceptable sensory quality. Also, as the rising trend of plant-based milk alternatives, further adjustments in the formula should be conducted in order to improve the quality of rice pudding made from soybean milk – product for consumers suffering from lactose intolerance or for places where cow milk supply is insufficient.

Key words: pudding, Jasmine rice, Riceberry, milk, dessert

* Corresponding author; e-mail address: wannasawat.r@ku.ac.th

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

In the past, dessert was available only to the wealthy elite, and even to that minority it was undeniably tangential to their existence (Michael, 2011). The market for desserts has grown over the last few decades as a result of an increase in commercialized baked goods and the rise of food production. Desserts have different variations which depend on different cultures and geographical regions (Dawn, 2011). Pudding, a type of food that can be either a dessert or a savory non-sweet dish which is a part of the main meal (Lynne, 2015). Pudding is starch based on milk protein having semisolid texture (Alamprese and Mariotti, 2011) which was first known in the 19^{th} when people used it as a medicine to settle upset stomach (Alan, 1999). Pudding market is wide when it can be combined with a wide range of ingredients resulting in the creation of many types of flavored puddings in order to serve different consumer preferences. Rice pudding nowadays has been commercialized to an increasing extent nowadays with it being included in many types of culture cuisines because it is easy to make and is often associated with good nutrition and easy digestion.

Thailand has a strong tradition of rice production and is one among others in the world with the greatest biodiversity of rice varieties (Praprut and Sutunya, 2016). With the available diversified source of main ingredient, it is potential to develop rice pudding as a healthy dessert for consumers. In recent years, various studies have been used to investigate different characteristics of rice pudding to meet the need of consumers. The objective of this research was to investigate the effect of different varieties of rice flour and two types of milk on rice pudding properties.

MATERIALS AND METHODS

1. Rice flour preparation

Paddy of Prachinburi 2 rice was from Rice Department (Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand) whereas the kernels of Jasmine brown rice and Riceberry rice were purchased from local market. After obtaining the rice kernels, rice flour was produced using pin mill (Bonny, YTP-302S, Yor Yong Hah Heng Ltd., Thailand) before passing through 100 mesh sieve to obtain homogeneous particle size. Each rice flour was kept in aluminum bag and stored at 4°C until used.

2. Rice pudding preparation

Rice pudding was prepared using three varieties of rice flour (Prachinburi 2 rice flour, Jasmine rice flour and Riceberry rice flour) and two types of milk (UHT plain cow milk and UHT soybean milk). Rice pudding was made by adding 12% of rice flour, 50% of milk, 30% of distilled water, 7.5% of sugar,

0.2% of salt, 0.2% of carrageenan and 0.1% of vanilla flavor in a pot. In general, six treatments were conducted for this study by combining each variety of rice flour and each type of milk using 3x2 factorial in completely randomized design (CRD). The pot containing rice flour, milk and distilled water were first cooked by using hot plate (Ika, C-Mag HS 7, Germany) until the mixture dissolved then other ingredients were added in. The mixture was cooked until it thickened (around 15-20 minutes) with the temperature maintained approximately at 100°C. Frequent stirring was required during cooking in order to assure all ingredients dissolved properly and to avoid the pudding from burning and sticking to the bottom of the pot. After cooling with cold water, rice pudding was packed in plastic container and stored at 4°C before analysis.

3. Determination of color, syneresis and sensory analysis

Color was measured using spectrophotometer (CM3500D, Minolta Co., Japan). Rice flour and rice pudding were added in the Petri dish and color parameters (L* - lightness, a* - red-green, b* - yellow-blue) values were recorded (Huang *et al*., 2016; Sánchez-Moreno *et al*., 2006). The whiteness index (WI) was calculated using equation given below (Lee *et al*., 2001; Leelayuthsoontorn and Thipayarat, 2006).

$$\mathrm{WI} = 100 - \sqrt{(100 - \mathrm{L}^2) + \mathrm{a}^2 + \mathrm{b}^2}$$

Study of syneresis was conducted by centrifuging 30 g of rice pudding at 6800xg for 10 minutes using refrigerated centrifuge (Rotina380R, Hettich, Germany) in order to separate supernatant (Choi and Kerr, 2003). After decanting and weighing the water released, syneresis index was determined as percent weight of water released on centrifugation per unit weight of pudding.

Sensory evaluation of rice pudding was assessed by fifty untrained panelists using Nine-point hedonic scale to obtain liking scores on appearance, color, smoothness, rice flavor, milk flavor, sweetness and overall liking.

4. Statistical analysis

Software SPSS Statistics version 12 (SPSS Inc., USA) was used for statistical analysis. All experiments were conducted in three different replications. Mean values with standard deviation were reported.

RESULTS AND DISCUSSIONS

1. Color properties of rice pudding

After cooking, color parameters of all puddings changed. When conducting statistical analysis, L*, a*, b* and WI of 6 samples were significantly different. However, a* of Pra-Soy (0.58±0.22) and that of Jas-Soy (1.03±0.09) were not significantly different (Table 1). Prachinburi 2 rice pudding was the brightest while Riceberry rice pudding with its specific color – light purple showed the lowest lightness (34.98-38.96). Color properties of rice flour (data not shown) indicated similar results when Prachinburi 2 flour had the highest L* and WI, following by Jasmine flour and Riceberry flour. In other words, color of rice pudding was affected by variety of rice flour used. Besides that, type of milk was also responsible for the significant differences of color parameters. Soybean milk which has a light brown color can be a reason for darker color of rice pudding compared to pudding added cow milk. According to USDA (2015), there is no standard for color of pudding that the pudding must possess a color typical of the applicable flavor. Generally, L* and WI of the rice puddings made from soy milk were significantly lower than those of rice puddings added cow milk when using the same rice variety (Table 1).

Table 1 Color parameters of rice puddings after one day storage at 4°C.

Rice pudding (Rice flour variety-Milk type)	L*	a*	b*	WI
Pra-Cow	86.65 ± 0.2^{a}	-1.85 ± 0.04^{e}	8.24 ± 0.02^{d}	84.20 ± 0.09^{a}
Pra-Soy	78.91 ± 0.14^{c}	0.58 ± 0.22^{c}	13.23 ± 0.25^{b}	75.09 ± 0.02^{c}
Jas-Cow	82.37 ± 0.10^{b}	-0.88 ± 0.13^{d}	11.14 ± 0.06^{c}	79.12 ± 0.06^{b}
Jas-Soy	74.65 ± 0.14^{d}	1.03 ± 0.09^{c}	15.06 ± 0.23^{a}	70.49 ± 0.23^{d}
Ber-Cow	38.96 ± 0.09^{e}	9.50 ± 0.12^{a}	2.45 ± 0.08^{e}	38.18 ± 0.10^{e}
Ber-Soy	34.98 ± 1.39^{f}	6.85 ± 0.35^{b}	1.26 ± 0.12^{f}	34.60 ± 1.42^{f}

$^{a-f}$ Means within the same column followed by different letters were significantly different (p<0.05).

Note: Pra: Prachinburi 2 rice flour; Jas: Jasmine brown rice flour; Ber: Riceberry rice flour.

2. Syneresis index of rice pudding

Syneresis is defined as a term to describe liquid oozing out of some types of food such as jams, dairy products, jellies, as well as meat and soybean products (Mizrahi, 2010). The higher syneresis index, the more leached water. Table 2 showed that expelled water was obtained from all treatments. After 28 days, there was no significant difference between the top three puddings Pra-Soy, Jas-Soy and Jas-Cow which had the most leached water (20.34%-21.7%). The trend between two

samples using Riceberry rice flour was similar that syneresis index increased when storing pudding at 4°C for 28 days. However, syneresis of puddings from other rice varieties had some fluctuation. There was no significant difference between syneresis index of puddings made from soybean milk and cow milk when using Jasmine flour at day 1, 14 and 28 and puddings made from Riceberry rice flour at day 14, 21 and 28. Through the results from Table 2, rice pudding recipe from of Prachinburi 2 flour and cow milk had the least expelled water with the average of syneresis index not more than 10% (2.82%-8.08%).

Table 2 Estimated syneresis (%) of rice pudding during 28 days at 4°C.

Rice pudding (Rice flour variety-Milk type)	Storage time			
	Day 1	Day 14	Day 21	Day 28
Pra-Cow	2.22 ± 0.84^{cd}	8.08 ± 1.47^{c}	5.82 ± 0.57^{d}	4.78 ± 0.17^{c}
Pra-Soy	5.85 ± 0.20^{b}	19.98 ± 0.73^{a}	19.89 ± 0.44^{a}	21.70 ± 1.83^{a}
Jas-Cow	11.09 ± 0.23^{a}	17.47 ± 0.59^{b}	20.15 ± 0.76^{a}	20.67 ± 0.59^{a}
Jas-Soy	10.39 ± 1.05^{a}	15.89 ± 0.56^{b}	16.70 ± 0.6^{b}	20.34 ± 0.96^{a}
Ber-Cow	0.70 ± 0.09^{d}	8.59 ± 0.59^{c}	10.92 ± 1.81^{c}	13.22 ± 1.47^{b}
Ber-Soy	2.92 ± 0.22^{c}	10.03 ± 0.20^{c}	12.94 ± 0.77^{c}	14.51 ± 0.45^{b}

$^{a-d}$ Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p<0.05$).

Note: Pra: Prachinburi 2 rice flour; Jas: Jasmine brown rice flour; Ber: Riceberry rice flour.

3. Sensory analysis of rice pudding

Liking mean scores of rice pudding are presented in Table 3. A significant difference between appearance of Pra-Cow pudding and other samples proved that it created a nice appearance which was received the highest score among samples (7.7±0.99). In terms of color, all puddings were accepted when they were above average with the liking scores from 6.4 to 7.68. Collating the results with data of color parameters, it might prove that panelists tended to have strong impression on rice pudding with high lightness and whiteness index or in other words, brighter colors might attract consumers. Smoothness of samples made by soybean milk received lower scores compared to that of samples used cow milk, but no significant difference was observed when using the same rice flour variety. Six formulas of rice pudding received pleasant scores for rice flavor (6.2-7.08), milk flavor (6.02-6.82) and sweetness (6.6-7.06). Four of the seven rice puddings (Pra-Cow, Pra-Soy, Jas-Cow and Ber-Cow) received the highest scores of overall liking attributes with no significant difference between their scores (6.48-6.86). On a whole, rice pudding from Prachinburi 2 flour and cow milk was preferred since it received the highest liking mean score on all attributes.

Table 3 Sensory liking scores of rice puddings made from various rice varieties and milk types.

Rice pudding (Rice flour variety-Milk type)	Appearance	Color	Smoothness	Rice Flavor	Overall Liking
Pra-Cow	7.70 ± 0.99[a]	7.68 ± 0.87[a]	6.92 ± 1.14[a]	6.38 ± 1.54[ab]	6.82 ± 1.29[a]
Pra-Soy	6.94 ± 1.15[b]	7.10 ± 1.04[ab]	6.00 ± 1.63[bc]	6.74 ± 1.41[ab]	6.48 ± 1.07[ab]
Jas-Cow	6.60 ± 1.54[b]	7.20 ± 1.12[ab]	6.00 ± 1.54[bc]	6.76 ± 1.33[ab]	6.50 ± 1.37[ab]
Jas-Soy	6.32 ± 1.19[b]	6.40 ± 1.37[c]	5.48 ± 1.49[c]	6.20 ± 1.6[b]	6.00 ± 1.26[b]
Ber-Cow	6.60 ± 1.39[b]	6.78 ± 1.42[bc]	6.52 ± 1.67[ab]	6.96 ± 1.34[ab]	6.86 ± 1.23[a]
Ber-Soy	6.46 ± 1.25[b]	6.70 ± 1.36[bc]	6.32 ± 1.45[ab]	7.08 ± 1.26[a]	6.60 ± 1.14a[b]

[a-c] Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p<0.05$).

Note: Pra: Prachinburi 2 rice flour; Jas: Jasmine brown rice flour; Ber: Riceberry rice flour.

CONCLUSIONS

The results showed that the color of rice puddings was highly affected by variety of rice flour and milk type used as well. The incorporation of Prachinburi 2 rice flour and cow milk could create rice pudding with better ability of holding water after 28 days of storage at 4°C compared to other recipes. Sensory results also proved that six recipes of rice pudding were approved at an above average level but the most preferred belonging to pudding made from Prachinburi 2 rice flour and cow milk receiving the highest liking mean score on all attributes. It is necessary to investigate the shelf-life stability of rice pudding with acceptable sensory quality. Also, as the rising trend of plant-based milk alternatives, further adjustments in the formula should be conducted in order to improve the quality of rice pudding made from soybean milk – product for consumers suffering from lactose intolerance or for places where cow milk supply is insufficient.

ACKNOWLEDGEMENT

The funding granted from Kasetsart University, Faculty of Agro-Industry and Department of Product Development through AI Scholarship to support Miss Le Ngoc Phuong Uyen for pursuing Master degree was greatly appreciated.

REFERENCES

Alamprese, C. and M. Mariotti. 2011. Effects of different milk substitutes on pasting, rheological and textural properties of puddings. **LWT – Food Science and Technology**. 44: 2019-2025.

Alan, D. 1999. **Oxford Companion to Food**, 1st ed: 665. Oxford University Press, Oxford.

Choi, S., W. Kerr. 2003. Water mobility and textural properties of native and hydroxypropylated wheat starch gels. **Carbohydrate Polymers** 51(1): 1–8.

Dawn, D. 2011. **Sunday Book Review: "How We Got to Dessert"**. The New York Times. USA (Online). https://www.nytimes.com/2011/12/04/books/review/how-we-got-to-dessert.html, 2 December 2011.

Huang, R., M. Ye, X. Li, L. Ji, M. Karwe and H. Chen. 2016. Evaluation of high hydrostatic pressure inactivation of human norovirus on strawberries, blueberries, raspberries and in their purees. **International Jeournal of Food Microbiology**. 223: 17-24.

Lee, Y. S., J.M. Cho, and C.O. Rhee. 2001. Gelatinization characteristics of pigmented rice starch (Suwon-415). **Food Science and Biotechnology** 10(4): 397-402

Leelayuthsoontorn, P. and A. Thipayarat. 2006. Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions. **Food Chemistry**. 96: 606-613.

Lynne, O. 2015. **Food Timeline FAQs: puddings, custards, & creams. The Food Timeline.** USA. (Online). http://www.foodtimeline.org/foodpuddings.html#whatis, 5 February 2015.

Michael, K. 2011. **Sweet Invention: A History of Dessert**, 1st ed: 14. Chicago Review Press, Chicago.

Praprut, P. and P. Sutunya. 2016. Collection and Evaluation of Local Thai Rice Varieties (*Oryza sativa* L.). 2016. **Journal of Life Sciences**. 10: 371-374.

Mizrahi, S. 2010. Syneresis in food gels and its implications for food quality. *In* "**Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages**". L. H. Skibsted, J. Risbo and M. L. Andersen (eds.): 324-348. Woodhead Publishing, Cambridge.

Sánchez-Moreno, C., L. Plaza, B. de Ancos and M.P. Cano. 2006. Impact of high-pressure and traditional thermal processing of tomato purée on carotenoids, vitamin C and antioxidant activity. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 86(2): 171-179.

USDA. 2015. **Commercial item description: Puddings, Shelf stable, Ready-to-use.** USA. (Online). https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/CID%20Puddings%2C%20Shelf%20Stable%2C%20Ready-To%20Eat.pdf, 2 March 2015.

การคำนวณสูตรอาหารไก่อินทรีย์ด้วยกำหนดการเชิงเส้น

Organic Chicken Feed Formulation by Linear Programming

วราลี พุทธรัสสุ[1*] และ ปรารถนา ปรารถนาดี[1]

Waralee Puttharassu[1*] and Parthana Parthanadee[1]

บทคัดย่อ

มาตรฐานสินค้าเกษตรไทยสำหรับปศุสัตว์อินทรีย์กำหนดให้อาหารสัตว์อินทรีย์ต้องมีวัตถุดิบที่ผลิตในระบบเกษตรอินทรีย์ไม่ต่ำกว่า 80% ของวัตถุดิบแห้ง การศึกษานี้นำเสนอการคำนวณสูตรอาหารสัตว์สำหรับการผลิตปศุสัตว์อินทรีย์ด้วยวิธีการกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming Model, LP) โดยพิจารณาการใช้วัตถุดิบทดแทนจากระบบเกษตรอินทรีย์ที่เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนอาหารสัตว์ของเกษตรกร โดยใช้การพัฒนาสูตรอาหารไก่อินทรีย์เป็นกรณีศึกษา พบว่า สูตรอาหารไก่เนื้อที่เสนอมีต้นทุน 14.94 บาทต่อกิโลกรัม (ลดลง 17.23%) และสูตรอาหารไก่ไข่มีต้นทุน 15.80 บาทต่อกิโลกรัม (ลดลง 12.79%) โดยในสูตรอาหาร ได้ลดการใช้ปลาป่นอินทรีย์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีต้นทุนสูง และเพิ่มการใช้กากมะพร้าว หนอนแมลงวันลายแห้ง และใบกระถินป่น ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สามารถจัดหาได้จากในพื้นที่หรือสามารถผลิตได้เองในฟาร์ม ทั้งนี้ เกษตรกรสามารถนำแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณสูตรอาหารสัตว์อินทรีย์ที่ได้นำเสนอนี้ไปใช้ในการคำนวณปรับสูตรอาหารสัตว์อินทรีย์เพื่อลดต้นทุนอาหารสัตว์ต่อไป

ABSTRACT

Thai agricultural standard for organic livestock specifies that organic feeds must contain, on a dry matter basis, at least 80% of the raw materials produced in the organic agricultural system. This study presented a feed formulation for organic livestock production by linear programming (LP), by considering the uses of appropriate alternative organic raw materials, in order to reduce farmers' feed costs. The organic chicken feed formulation was used as a case study. The result showed that the proposed broiler feed formula costs 14.94 baht/kilogram (17.23% cheaper) and the proposed layer feed formula costs 15.80 baht/kilogram (12.79% cheaper). The proposed feed formulas suggested decreasing the amount of organic fish meal, which was a costly raw material, and increasing the amount of organic coconut meal, dried black soldier flies and Leucaena leaf meal, which could be procured locally or produced in own farms. The farmers can use the proposed mathematical model for organic feed formulation to adjust their feed formulas for further feed cost reduction.

Key words: Organic livestock, Organic Feed Chicken, Linear Programming

* Corresponding author; e-mail address: waralee.putt@ku.th

---

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันผู้บริโภคนิยมบริโภคอาหารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ธุรกิจสินค้าอินทรีย์มีแนวโน้มเติบโต คาดว่าปี 2561 มูลค่าสินค้าอินทรีย์ของไทยจะอยู่ที่ 2,700 – 2,900 ล้านบาท (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2561) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ปศุสัตว์อินทรีย์เป็นที่ต้องการของตลาดมากยิ่งขึ้น ในการผลิตปศุสัตว์อินทรีย์ ผู้ผลิตต้องปรับเปลี่ยนการเลี้ยงสัตว์อินทรีย์ให้เป็นไปตามข้อกำหนด ซึ่งแตกต่างจากการเลี้ยงสัตว์ตามอุตสาหกรรมโดยทั่วไปในด้านของการดูแลสุขภาพสัตว์และการจัดการฟาร์ม ต้องให้สัตว์มีพฤติกรรมและการผสมพันธุ์ที่เป็นไปตามธรรมชาติ ในฟาร์มมีพื้นที่สำหรับให้สัตว์ได้ออกกำลังกายไม่ให้เกิดความเครียดที่นำมาสู่โรค หลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีในอาหารสัตว์ ในด้านของอาหารสัตว์อินทรีย์ วัตถุดิบที่ใช้จะต้องมีวัตถุดิบที่ผลิตในระบบเกษตรอินทรีย์ไม่ต่ำกว่า 65% ของวัตถุแห้งสำหรับสูตรอาหารสัตว์กระเพาะเดี่ยว และไม่ต่ำกว่า 70% ของวัตถุดิบแห้งสำหรับสูตรอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง ในระยะเริ่มดำเนินการปรับเปลี่ยน และปรับเป็นไม่ต่ำกว่า 80% และ 90% ตามลำดับ ในกรณีที่ไม่สามารถจัดหาวัตถุดิบอาหารสัตว์อินทรีย์ได้ 100% โดยต้องได้รับความเห็นชอบจากหน่วยรับรองก่อน (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรแห่งชาติ, 2561) วัตถุดิบอาหารสัตว์อินทรีย์ส่วนใหญ่ที่เกษตรกรใช้จะเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตได้เอง หรือสามารถหาซื้อได้จากแหล่งผลิตที่ได้รับการรับรองหรือมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งเกษตรกรมักประสบปัญหาการขาดแคลนแหล่งวัตถุดิบโปรตีนที่ผลิตในระบบเกษตรอินทรีย์ เนื่องจากวัตถุดิบมีจำกัดและมีราคาสูง อีกทั้งแหล่งผลิตมักอยู่ห่างไกลทำให้มีต้นทุนค่าขนส่งสูง แหล่งวัตถุดิบโปรตีนทดแทนที่เกษตรกรสามารถผลิตเองได้ในบริเวณที่เกษตรกรอยู่อาศัย หรือรวมกลุ่มส่งเสริมให้เกษตรกรในละแวกใกล้เคียงผลิตให้ เช่น หนอนแมลงวัน ใบกระถิน ใบมันสำปะหลัง และถั่วมะแฮะ เป็นต้น หนอนแมลงวันลายเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เป็นแหล่งโปรตีนที่สามารถนำมาเลี้ยงสัตว์ได้ มีปริมาณโปรตีนสูง 45% วิธีการเลี้ยงไม่ยุ่งยากและสามารถเลี้ยงได้ในบริเวณที่จำกัด จึงเป็นตัวเลือกของวัตถุดิบโปรตีนทดแทนที่ดี (กองนโยบายเทคโนโลยีเพื่อการเกษตรและเกษตรกรรมยั่งยืน, 2556) ส่วนวัตถุดิบทดแทนจากแหล่งวัตถุดิบพื้นบ้าน เช่น ใบกระถิน ใบมันสำปะหลัง ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 20% ก็เป็นตัวเลือกในสูตรอาหารสัตว์ได้ ใบมันสำปะหลังป่นสามารถทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารไก่ได้ถึง 5% โดยไม่มีความแตกต่าง (สุเมธ และสมคิด, 2547) ใบกระถินตากแห้งบดละเอียดทดแทนในอาหารไก่ได้ 7% (สายชล และวรพงษ์, 2560) สำหรับการคำนวณสูตรอาหารสัตว์ วิธีที่นิยมใช้คือ วิธีกำหนดการเชิงเส้น ใช้สำหรับการวิเคราะห์การผลิตการจัดการการเกษตร ที่มีวัตถุประสงค์ที่แน่นอน เพื่อให้ได้ต้นทุนต่ำที่สุด มีทางเลือกวิธีการ ภายใต้ข้อจำกัดในด้านโภชนะการอาหาร และข้อจำกัดในการผลิต ในการเลือกใช้วัตถุดิบสามารถเลือกใช้ได้หลายชนิดเพื่อให้มีความเหมาะสมมากที่สุด ซึ่งแตกต่างจากการคำนวณอาหารสัตว์วิธีอื่นที่มีข้อจำกัดในการใช้ชนิดวัตถุดิบเพียงสองกลุ่มและปริมาณโภชนะการที่ต้องมีหน่วยเป็นร้อยละ (พงศพิชาญ, 2550) งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการคำนวณสูตรอาหารสัตว์สำหรับการผลิตปศุสัตว์อินทรีย์ที่มีต้นทุนต่ำโดยพิจารณาเลือกใช้วัตถุดิบทดแทนจากระบบเกษตรอินทรีย์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming Model, LP) และพัฒนาสูตรอาหารไก่อินทรีย์เป็นกรณีศึกษา

อุปกรณ์และวิธีการ

1. ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ เช่น ข้อกำหนดตามมาตรฐานของการผลิตปศุสัตว์อินทรีย์ และมาตรฐานการเกษตรอินทรีย์ ข้อมูลความต้องการโภชนะที่เหมาะสมสำหรับไก่ คุณค่าทางโภชนะในวัตถุดิบแต่ละชนิด สำหรับนำมาคำนวณสูตรอาหารไก่อินทรีย์

2. เก็บข้อมูลการผลิตอาหารไก่อินทรีย์โดยการสัมภาษณ์กลุ่มเกษตรกรกรณีศึกษาที่มีเลี้ยงไก่อินทรีย์ ในจังหวัดนครปฐม

3. แบ่งประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ในสูตรอาหารสัตว์ ที่เป็นแหล่งของพลังงาน ได้แก่ ปลายข้าว รำละเอียด น้ำมันพืช แหล่งของโปรตีน ได้แก่ กากถั่วเหลือง ปลาป่นอินทรีย์ กากมะพร้าว หนอนแมลงวันลายแห้ง ใบกระถินป่น ใบมันสำปะหลัง ถั่วมะแฮะ และแหล่งของแร่ธาตุ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (หินปูน) โมโนไดแคลเซียมฟอสเฟต P21% (P21) เพื่อศึกษาปริมาณวัตถุดิบในสูตรอาหารสัตว์อินทรีย์ที่ทำให้ราคาอาหารสัตว์ต่ำที่สุด

4. สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณสูตรอาหารไก่อินทรีย์โดยวิธีการกำหนดการเชิงเส้น (LP) ใน Microsoft Excel โดยกำหนดตัวแปรตัดสินใจ คือ สัดส่วนของวัตถุดิบแต่ละชนิดในอาหารสัตว์ ภายใต้สมการข้อจำกัดความต้องการคุณค่าทางโภชนะ ข้อจำกัดในการใช้วัตถุดิบ และปริมาณวัตถุดิบอินทรีย์ขั้นต่ำในสูตรอาหารสัตว์ เพื่อให้ได้ต้นทุนอาหารสัตว์รวมต่ำที่สุด

5. คำนวณสูตรอาหารไก่อินทรีย์ด้วยวิธีการกำหนดการเชิงเส้น สำหรับไก่เนื้อและไก่ไข่

แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณสูตรอาหารสัตว์อินทรีย์สำหรับอาหารไก่อินทรีย์

แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณสูตรอาหารไก่อินทรีย์ด้วยวิธีการกำหนดการเชิงเส้น เพื่อเลือกใช้วัตถุดิบอาหารไก่อินทรีย์ที่เหมาะสม และให้สูตรอาหารไก่อินทรีย์มีคุณค่าทางโภชนะเป็นไปตามข้อกำหนดและมีต้นทุนอาหารสัตว์ที่เหมาะสม แสดงได้ดังนี้

ดัชนีและเซ็ต

i = ชนิดของวัตถุดิบอาหารไก่ โดย $i \in I; I = I_1 \cup I_2$ โดยที่ $I_1 = \{1, \dots, I'\}$ คือ ชนิดของวัตถุดิบอาหารไก่อินทรีย์ และ $I_2 = \{I' + 1, \dots, I\}$ คือ ชนิดของวัตถุดิบอาหารสัตว์ทั่วไป

j = ประเภทของคุณค่าทางโภชนะ โดย $j \in J; j = \{1, \dots, J\}$

k = ประเภทของอาหารไก่ โดย $k \in K; k = \{1, \dots, K\}$

พารามิเตอร์

C_i = ต้นทุนของวัตถุดิบอาหารไก่ i (บาท/กิโลกรัม)

S_i = ปริมาณของอุปทานวัตถุดิบอาหารไก่ i ที่สามารถจัดหาได้ (กิโลกรัม)

D_k = ปริมาณอาหารไก่ k ที่ต้องการ (กิโลกรัม)

N_{ij} = คุณค่าทางโภชนะ j ที่ได้จากวัตถุดิบอาหารไก่ i

$L_{jk} =$ ปริมาณต่ำสุดของคุณค่าทางโภชนะ j ที่ต้องมีในสูตรอาหารไก่ k

$U_{jk} =$ ปริมาณสูงสุดของคุณค่าทางโภชนะ j ที่มีได้ในสูตรอาหารไก่ k

Min_{ik} = เปอร์เซ็นต์ต่ำสุดของวัตถุดิบอาหารไก่ i ที่ต้องมีในสูตรอาหารไก่ k

Max_{ik} = เปอร์เซ็นต์สูงสุดของวัตถุดิบอาหารไก่ i ที่มีได้ในสูตรอาหารไก่ k

DM_i = เปอร์เซ็นต์วัตถุแห้ง (Dry matter) ในวัตถุดิบอาหารไก่ i

O_k = เปอร์เซ็นต์ของปริมาณวัตถุดิบที่ผลิตในระบบอินทรีย์ที่มีอยู่ในสูตรอาหารไก่ k (ในรูปน้ำหนักแห้ง)

ตัวแปรตัดสินใจ

$X_{ik} =$ ปริมาณของวัตถุดิบอาหารไก่ i ที่ใช้ในสูตรอาหารไก่ k

สมการเป้าหมาย (Objective function): ต้นทุนอาหารไก่อินทรีย์ที่ต่ำที่สุด (บาท)

$$Minimize \quad \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=1}^{I} C_i X_{ik} \tag{1}$$

ข้อจำกัด (Constraints):

- ปริมาณวัตถุดิบอาหารไก่ที่ใช้ต้องไม่เกินปริมาณของอุปทานวัตถุดิบอาหารไก่ที่สามารถจัดหาได้

$$\sum_{k=1}^{K} X_{ik} \le S_i \qquad \forall i \in I \tag{2}$$

- ข้อจำกัดด้านปริมาณอาหารไก่ที่ต้องการ

$$\sum_{i=1}^{I} X_{ik} = D_k \qquad \forall k \in K \tag{3}$$

- ข้อจำกัดด้านคุณค่าทางโภชนะในสูตรอาหารไก่

$$L_{jk} \leq \frac{\sum_{i=1}^{I} N_{ij} X_{ik}}{\sum_{k=1}^{K} X_{ik}} \leq U_{jk} \qquad \forall j \in J;\ \forall k \in K \quad (4)$$

- ข้อจำกัดของการใช้วัตถุดิบในสูตรอาหารไก่

$$Min_{ik} \leq \frac{X_{ik}}{\sum_{i=1}^{I} X_{ik}} \leq Max_{ik} \qquad \forall i \in I;\ \forall k \in K \quad (5)$$

- ปริมาณของวัตถุดิบที่ผลิตในระบบอินทรีย์ที่มีอยู่ในสูตรอาหารไก่มีสัดส่วนเป็นไปตามที่กำหนด

$$\sum_{i=1}^{I'} DM_i X_{ik} \geq O_k \sum_{i=1}^{I} DM_i X_{ik} \qquad \forall k \in K \quad (6)$$

- ปริมาณวัตถุดิบอาหารไก่ที่ใช้มีค่าเป็นศูนย์หรือบวก (non-negativity constraint)

$$X_{ik} \geq 0 \qquad \forall i \in I;\ \forall k \in K \quad (7)$$

การผลิตระบบปศุสัตว์อินทรีย์ กำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตรกล่าวไว้ว่า สูตรอาหารที่ใช้สำหรับพื้นที่การผลิตที่ไม่สามารถจัดหาวัตถุดิบอาหารสัตว์อินทรีย์ได้ 100% อาหารสัตว์ที่ใช้จะต้องมีวัตถุดิบที่ผลิตในระบบเกษตรอินทรีย์ในปริมาณไม่ต่ำกว่า 80% ของวัตถุแห้งสำหรับสัตว์กระเพาะเดี่ยว จากตารางที่ 1 จึงประกอบด้วยวัตถุดิบที่เป็นอินทรีย์ คือ ปลายข้าว รำข้าว ปลาป่น กากมะพร้าว หนอนแมลงวันลาย ใบกระถินป่น ใบมันสำปะหลังและถั่วมะแฮะ ในปริมาณของวัตถุดิบที่แตกต่างกันเพื่อปริมาณที่เป็นตามมาตรฐานสำหรับการคำนวณสูตรอาหารสัตว์ให้เป็นไปตามาตรฐานเกษตรอินทรีย์ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วัตถุดิบที่นำมาพัฒนาสูตรอาหารไก่ที่เกษตรกรสามารถเพาะปลูกได้ภายในฟาร์มและหาซื้อได้ง่าย

ทั้งนี้ ความต้องการโภชนะของไก่จะแตกต่างกันตามระยะของการเลี้ยง สำหรับไก่เนื้อ แบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ไก่เนื้อเล็ก (อายุ 0 – 10 วัน) ไก่เนื้อรุ่น (อายุ 11 – 24 วัน) ไก่เนื้อขุน (อายุมากกว่า 25 วัน) สำหรับไก่ไข่ แบ่งออกเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะก่อนไข่ (อายุ 0 – 20 สัปดาห์) และระยะให้ไข่ (อายุ 20 สัปดาห์จนปลดระวาง) (อุทัย, 2559) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกลุ่มเกษตรกรกรณีศึกษามีจำนวนไก่ที่เลี้ยงไม่มาก กลุ่มเกษตรกรจึงแบ่งอาหารไก่อินทรีย์ออกเป็นเพียง 2 สูตร คือ สูตรอาหารสำหรับไก่เนื้อ และสูตรอาหารสำหรับไก่ไข่ โภชนะการในสูตรอาหารไก่จึงเลือกใช้ช่วงของโภชนะการที่ไก่ต้องการคือ ช่วงความต้องการของไก่เนื้อขุนและไก่ไข่ในช่วงระยะให้ไข่ เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับสูตรอาหารไก่ของฟาร์มที่ศึกษานี้ ปัจจุบัน เกษตรกรใช้ปลายข้าวอินทรีย์ รำข้าวอินทรีย์ น้ำมันพืช กากถั่วเหลือง ปลาป่นอินทรีย์ กากมะพร้าวอินทรีย์ แคลเซียมคาร์บอเนต (หินปูน) และโมโนไดแคลเซียมฟอสเฟต P21% (P21) ในการผลิตอาหารไก่ ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาการใช้วัตถุดิบทดแทน ได้แก่ หนอนแมลงวันลายแห้ง ใบกระถินป่น ใบมันสำปะหลัง และถั่วมะแฮะ ในสูตรอาหารไก่ ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของวัตถุดิบในการผลิตอาหารไก่ที่ได้นำมาพิจารณา ข้อมูลราคาวัตถุดิบส่วนใหญ่ได้มาจากเกษตรกรและการสำรวจข้อมูล สำหรับหนอนแมลงวันลาย (Black Solider Fly, BSF) นั้น เป็นหนอนที่สามารถเพาะเลี้ยงได้ง่ายโดยใช้ขยะเปียกที่เป็นอินทรียวัตถุเป็นอาหาร จึงมีค่าใช้จ่ายในการเพาะเลี้ยงต่ำสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในการผลิตอาหารสัตว์ได้ดี (รุ่งทิพย์, 2561) แต่มีราคาจำหน่ายในท้องตลาดสูง โดยราคาหนอนแมลงวันลายสดอยู่ที่กิโลกรัมละ 500 บาท และราคาหนอนแมลงวันลายอบแห้งอยู่ที่กิโลกรัมละ 1,200 – 1,400 บาท (เพ็ญพิชญา, 2561) วรกร (2555) ได้ประมาณต้นทุนของหนอนแมลงวันลายสดที่เพาะเลี้ยงเองไว้ที่กิโลกรัมละ 12 บาท ซึ่งหนอนแมลงวันลายสดมีเปอร์เซ็นต์วัตถุแห้งอยู่ในช่วง 35 – 45% (Tran et al., 2015) ในการศึกษานี้ จึงได้ประมาณต้นทุนของหนอนแมลงวันลายแห้งที่ผลิตเองไว้ที่ 40 บาทต่อกิโลกรัม ในที่นี้ เกษตรกรยอมให้มีการใช้รำข้าวและปลาป่นเกินปริมาณที่แนะนำโดย วิโรจน์ และนพวรรณ (2538) และกำหนดปริมาณขั้นต่ำในการใช้แคลเซียมคาร์โบเนต และโมโนไดแคลเซียมฟอสเฟต P21% เพื่อเสริมแคลเซียมและฟอสฟอรัส เพื่อการเสริมสร้างกระดูกของไก่

Table 1 Cost, chemical composition, nutritional value, and limitation of feed ingredients.

List		Energy				Protein						Vitamin	
		Broken Rice	Rice Bran	Vegetable Oil	Soybean Meal	Fish Meal	Coconut Meal	Dried BFS	Leucaena Leaf Meal	Cassava Leaf Meal	Pigeon Pea	Lime stone	P21
Cost *	(Baht/kg)	11.00	11.00	26.00	15.00	62.00	11.00	40.00	1.00	4.00	22.00	3.00	26.00
%DM	(%)	87.6	89.9	0	88.5	91.6	92.2	91.3	90	90	90	99.5	99.5
ME	(kcal/kg)	3,465	2,748	8,800	2,340	3,000	2,800	2,900	900	2,000	1,865	-	-
Protein	(%)	8	12	-	44	58	21	45.13	20.2	23	20	-	-
Fat	(%)	0.9	12	100	0.5	7.5	6	14.52	3.5	7.5	2.1	-	-
CF	(%)	1	12	-	1	1	12	5.9	18	21	6.8	-	-
Ca	(%)	0.03	0.06	-	0.25	6.7	0.2	2.95	0.54	0.99	0.62	35	21
P	(%)	0.04	0.47	-	0.2	2.5	0.2	2.31	0.3	0.25	0.23	-	18
Lys	(%)	0.27	0.55	-	2.73	3.95	0.59	3.24	1.1	1.92	1.18	-	-
Met	(%)	0.27	0.25	-	0.6	1.44	0.37	0.89	0.28	0.15	0.16	-	-
M+C	(%)	0.32	0.5	-	1.26	1.73	0.5	1.34	0.63	0.3	0.35	-	-
Trp	(%)	0.1	0.1	-	0.46	0.46	0.16	0.52	0.2	0.29	0.15	-	-
Thr	(%)	0.36	0.4	-	1.72	2.13	0.65	1.72	0.8	1.64	0.8	-	-
Organic		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	- (0.2**)	- (0.07**)
Max	-	-	10 (30**)	5	-	10 (15**)	10	-	4	4	30	-	

Note: %DM = % dry matter; ME = metabolizable energy for poultry; CF = crude fiber; Ca = Calcium; P = Phosphorus; Lys = Lysine; Met = Methionine; M+C = Methionine + Cystine; Trp = Tryptophan; Thr = Threonine; costs were obtained from farmers and estimation; ** = limitations set by farmers

Source: Wanasitchaiwat and Chomchai (1995); Bureau of Agricultural Economic Research (2011); Bureau of Animal Nutrition Development (2019)

ผลการทดลองและวิจารณ์

เนื่องจากกลุ่มเกษตรกรผลิตอาหารไก่อินทรีย์ในปริมาณไม่มาก ปริมาณของอุปทานวัตถุดิบอาหารสัตว์อินทรีย์ที่สามารถจัดหาได้จึงมีเพียงพอต่อความต้องการในปัจจุบัน ตารางที่ 2 และ 3 แสดงการเปรียบเทียบสูตรอาหารไก่เนื้อและไก่ไข่ที่เกษตรกรใช้และที่ได้พัฒนาขึ้น ตามลำดับ จากตาราง สูตรอาหารไก่เนื้อที่พัฒนามีต้นทุน 14.94 บาทต่อกิโลกรัม ต่ำกว่าต้นทุนของสูตรอาหารไก่เนื้อเดิม 17.23% โดยเพิ่มปริมาณการใช้ปลายข้าว กากถั่วเหลือง และกากมะพร้าว ไม่ใช้รำข้าว รวมถึงลดการใช้ปลาป่นอินทรีย์ ซึ่งมีต้นทุนวัตถุดิบสูง และอาจทำให้ผลผลิตมีกลิ่นคาว (วิโรจน์ และนพวรรณ, 2538) และใช้ใบกระถินป่นทดแทน สูตรอาหารไก่เนื้อที่พัฒนาขึ้นสอดคล้องกับความต้องการโภชนะสำหรับไก่เนื้อขุนที่เสนอโดยอุทัย (2559) มากขึ้นกว่าสูตรอาหารเดิม โดยมีเพียงค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (ME) ไลซีน (Lys) เมทไธโอนีนและซิสทีน (M+C) ที่ต่ำกว่าความต้องการโภชนะที่เสนอโดยอุทัย (2559) เล็กน้อย ขณะที่สูตรอาหารไก่ไข่ที่พัฒนามีต้นทุน 15.80 บาทต่อกิโลกรัม ต่ำกว่าต้นทุนของสูตรอาหารไก่ไข่เดิม 12.79% โดยลดปริมาณการใช้ปลายข้าวและรำข้าว ใช้น้ำมันพืชเพื่อเพิ่มพลังงาน ไม่ใช้ปลาป่นอินทรีย์ และเพิ่มการใช้กากมะพร้าว หนอนแมลงวันลายแห้ง และใบกระถินป่น ทั้งนี้ สูตรอาหารไก่ไข่เดิมและที่พัฒนาขึ้นยังมีเมทไธโอนีนและซิสทีนต่ำกว่าความต้องการโภชนะสำหรับไก่ไข่อายุ 29 สัปดาห์ขึ้นไป ที่ปริมาณการกินอาหาร 120 กรัมต่อวัน ที่เสนอโดยอุทัย (2559) เล็กน้อย

Table 2 Organic feed formula for broiler.

a. Amount of feed ingredients

Ingredient	Current	Proposed
Cost (Baht/kg)	18.05	14.94
Broken rice	45.00%	59.48%
Rice bran	25.50%	-
Vegetable oil	2.00%	1.18%
Soybean meal	10.00%	18.57%
Fish meal	12.00%	6.37%
Coconut meal	4.00%	10.00%
Leucaena leaf meal	-	3.29%
Lime stone	0.20%	0.27%
P21	2.00%	0.83%

b. Nutrient levels in organic feed for broiler

List	Current	Proposed	LP		Kantho (2016)	
			Min	Max	Min	Max
ME	3,120	3,100	3,100	3,500	3,200	-
Protein	18.73	19.39	18	100	19	21
Fat	6.61	3.00	3	8	3	-
CF	4.18	2.64	0	5	0	4
Ca	1.35	0.80	0.80	100	0.80	-
P	0.82	0.40	0.40	100	0.40	-
Lys	1.03	1.01	1.00	100	1.09	-
Met	0.43	0.41	0.41	100	0.41	-
M+C	0.62	0.61	0.60	100	0.65	-
Trp	0.18	0.20	0.17	100	0.18	-
Thr	0.71	0.76	0.70	100	0.74	-
Organic	87.46	80.00	80	100		

Note: The underlined values are those that do not satisfy the nutrient requirements in Kantho (2016)

Table 3 Organic Feed Formula for Layer.

a. Amount of feed ingredients

Ingredient	Current	Proposed
Cost (Baht/kg)	18.12	15.80
Broken rice	51.75%	37.57%
Rice bran	12.34%	9.97%
Vegetable oil	-	1.58%
Soybean meal	10.00%	10.75%
Fish meal	14.36%	-
Coconut meal	3.36%	10.00%
Dried BFS	-	17.86%
Leucaena leaf meal	-	4.00%
Lime stone	7.91%	8.21%
P21	0.07%	0.07%

b. Nutrient levels in organic feed for

List	Current	Proposed	LP		Kantho (2016)	
			Min	Max	Min	Max
ME	2,897	2,800	2,800	3,200	2,800	-
Protein	19.10	19.90	16.30	100	16.30	-
Fat	3.28	6.50	3	6.5	3	-
CF	2.65	4.65	0	5	-	5
Ca	3.81	3.50	3.50	4	3.50	-
P	0.48	0.54	0.35	100	0.35	-
Lys	1.07	1.13	0.72	100	0.75	-
Met	0.45	0.40	0.38	100	0.38	-
M+C	0.62	0.62	0.62	100	0.64	-
Trp	0.18	0.21	0.17	100	0.17	-
Thr	0.74	0.76	0.55	100	0.55	-
Organic	81.23	80.00	80	100		

Note: The underlined values are those that do not satisfy the requirements in Kantho (2016)

จากสูตรอาหารอินทรีย์ที่ได้จากการพัฒนาจากกำหนดการเชิงเส้นและสูตรอาหารที่นำเสนอจากอุทัย จุดประสงค์เพื่อควบคุมต้นทุนการผลิตอาหารไก่ การพัฒนาสูตรอาหารไก่อินทรีย์นี้เป็นทางเลือกให้เกษตรกรในการเลี้ยงไก่ในอนาคตเพื่อนำไปใช้จริงสำหรับการเลี้ยงไก่เนื้อและไก่ไข่ สำหรับสูตรอาหารที่ได้พัฒนาขึ้นให้ราคาต้นทุนที่ต่ำกว่าสูตรอาหารเดิมที่เกษตรกรใช้ ในราคาต้นทุนที่เหมาะสมต่อการใช้เลี้ยงไก่ การพัฒนาอาหารไก่ยังต้องคำนึงถึง น้ำหนักของตัวไก่และอัตราการเติบโต และอาจส่งผลให้ระยะการเลี้ยงไก่มีระยะเวลาที่นานขึ้น จึงต้องทดลองใช้กับไก่ในจำนวนน้อยก่อนนำไปใช้จริง

สรุปผลและเสนอแนะ

จากการคำนวณสูตรอาหารไก่อินทรีย์ด้วยวิธีการกำหนดการเชิงเส้น โดยให้มีการใช้วัตถุดิบจากระบบเกษตรอินทรีย์อย่างน้อย 80% พบว่า ต้นทุนอาหารไก่ที่พัฒนาขึ้นถูกกว่าต้นทุนอาหารไก่เดิม 17.23% สำหรับอาหารไก่เนื้อ และ 12.79% สำหรับอาหารไก่ไข่ โดยลดการใช้ปลาป่นอินทรีย์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีต้นทุนสูง และเพิ่มการใช้กากมะพร้าว หนอนแมลงวันลายแห้ง และใบกระถินป่น ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สามารถจัดหาได้จากในพื้นที่หรือสามารถผลิตขึ้นเองในฟาร์ม ในสูตรอาหาร อย่างไรก็ตาม การพัฒนาสูตรอาหารนี้เป็นเพียงการคำนวณคุณค่าทางโภชนะอาหารสัตว์จากข้อมูลด้านคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์ ดังนั้น จึงต้องมีการนำสูตรอาหารที่พัฒนาขึ้นไปใช้ทดลองเลี้ยงไก่จริง เพื่อวัดอัตราการเจริญเติบโต อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และประเมินประสิทธิภาพการใช้อาหารของไก่ต่อไป ทั้งนี้ เกษตรกรสามารถนำแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณสูตรอาหารสัตว์อินทรีย์ด้วยวิธีการกำหนดการเชิงเส้นที่ได้นำเสนอนี้ไปใช้ในการคำนวณปรับสูตรอาหาร

สัตว์อินทรีย์ เพื่อควบคุมต้นทุนอาหารสัตว์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เมื่อราคาวัตถุดิบมีการเปลี่ยนแปลง หรือเพื่อพิจารณาการนำวัตถุดิบทดแทนอื่นๆ มาใช้ในสูตรอาหารสัตว์อินทรีย์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของแผนงานวิจัยการบริหารจัดการโซ่คุณค่าโปรตีนคุณภาพ (RDG62T0134) โครงการย่อยที่ 1 การศึกษาการบริหารจัดการโซ่อุปทานวัตถุดิบอาหารสัตว์อินทรีย์เพื่อป้อนสู่อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ปศุสัตว์ปลอดภัย: กรณีศึกษาปศุสัตว์อินทรีย์ภาคตะวันตก ซึ่งสนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานผู้สนับสนุนทุนวิจัยและกลุ่มเกษตรกรกรณีศึกษาที่ได้ให้ข้อมูลประกอบการศึกษาวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กองนโยบายเทคโนโลยีเพื่อการเกษตรและเกษตรกรรมยั่งยืน .2556. **แนวทางการลดต้นทุนอาหารสัตว์ของเกษตรกร**. สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

พงศ์พิชาญ สุคนธนิตย์. 2550. **โปรแกรมคำนวณสูตรอาหารสัตว์เศรษฐกิจ**. ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

เพ็ญพิชญา เตียว. 2561. **เพาะหนอนแมลงวันลาย กก.ละ 500-1,400 บาท.** หนังสือพิมพ์ไทยรัฐ (Online). https://www.thairath.co.th/news/local/1233626, 21 มีนาคม 2561.

รุ่งทิพย์ มาศเมธาทิพย์. 2561. มารู้จัก BFS แมลงวันที่มีประโยชน์. **เกษตรอภิรมย์** 4(24): 41-42.

วรกร มีปาน. 2555. **การใช้ข้าวเปลือกร่วมกับหนอนแมลงวันสดเป็นอาหารไก่พื้นเมืองช่วงอายุ 1- 6 สัปดาห์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.

วิโรจน์ วนาสิทธชัยวัฒน์ และ นพวรรณ ชมชัย. 2538. **วัตถุดิบอาหารสำหรับสุกรและสัตว์ปีก.** กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์. กรุงเทพฯ. 37 หน้า.

ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. 2561. **ตลาดออร์แกนิคธุรกิจสร้างเงิน SME ไทย** (Online). https://kasikornbank.com/th/business/sme/KSMEKnowledge/article/KSMEAnalysis/Pages/Thai-SME_Organic-Product.aspx, 5 ตุลาคม 2562.

สายชล เลิศสุวรรณ และ วรพงษ์ นลินานนท์. 2560. การใช้ใบกระถินในรูปแบบอัดเม็ดต่อสมรรถภาพการผลิตและคุณภาพซากไก่กระทง. **วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ** 20(27) (พิเศษ): 61-69.

สุเมธ หงส์สาชุม และ สมคิด ปัตพี. 2547. **การใช้ใบมันสำปะหลังป่นทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารไก่ลูกผสมพื้นเมือง**. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2561. **มาตรฐานสินค้าเกษตร เกษตรอินทรีย์ เล่ม 2: ปศุสัตว์อินทรีย์ มกษ. 9000 เล่ม 2-2561.** กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์. 2562. **ความรู้ด้านอาหารสัตว์** (Online). http://nutrition.dld.go.th/Nutrition_Knowlage/nutrition_1.htm, 10 ตุลาคม 2562.

สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. 2554. **การศึกษาความต้องการใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์**. เอกสารวิจัยเศรษฐกิจเลขที่ 110. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

อุทัย คันโธ. 2559. **อาหารสุกรและสัตว์ปีกเชิงประยุกต์.** บริษัท ยูเค ที พับลิชชิ่ง จำกัด. ฉะเชิงเทรา. 704 หน้า.

Tran G., C. Gnaedinger and C. Mélin. 2015. Black soldier fly larvae (Hermetia illucens). **Feedipedia** (Online). https://www.feedipedia.org/node/16388, November 12, 2019.

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ชและแป้งข้าวจากข้าวแอมิโลสสูง

Textural Properties of Fresh Rice Noodles Made from Starch and Flour of High Amylose Rice Cultivars

เกียรติศักดิ์ ปุหิ้น[1] Mika Fukuoka[3] และ สาวิตรี รัตนสุมาวงศ์[1,2*]

Kiattisak Puhin[1], Mika Fukuoka[3] and Savitree Ratanasumawong[1,2*]

บทคัดย่อ

เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ดีควรทำจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง อย่างไรก็ตามเส้นก๋วยเตี๋ยวจากข้าวต่างพันธุ์ให้คุณภาพที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างในองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของสตาร์ชในข้าวแต่ละพันธุ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพันธุ์ข้าวไทยซึ่งมีแอมิโลสสูง 5 พันธุ์ (พิษณุโลก2, อยุธยา 1, ชัยนาท1, เจ๊กเชย1 และปราจีนบุรี2) ต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสด โดยทำการศึกษาทั้งในเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ทำจากแป้งข้าวและสตาร์ชข้าว พบว่าสตาร์ชข้าวแต่ละพันธุ์มีสมบัติทางความร้อนและความหนืดที่ต่างกัน โดยพิษณุโลก2 มีอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชันและสมบัติทางความหนืดต่างๆ ต่ำที่สุด ค่าความแน่นเนื้อ แรงที่ใช้ในการดึงยืด และร้อยละการดึงยืดของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ชข้าวพันธุ์ปราจีนบุรี2 มีค่าสูงที่สุด ส่วนพันธุ์พิษณุโลก2 มีค่าต่ำที่สุด เส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวส่วนใหญ่จะมีความแน่นเนื้อ แรงที่ใช้ในการดึงยืด และร้อยละการดึงยืดต่ำกว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวจากสตาร์ช ยกเว้นเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวพันธุ์พิษณุโลก2 ที่มีค่าแรงที่ใช้ในการดึงยืดและร้อยละการดึงยืดสูงกว่าเส้นจากสตาร์ช คุณสมบัติของสตาร์ชซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเส้นก๋วยเตี๋ยวส่งผลถึงคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยวมากที่สุด อย่างไรก็ตามองค์ประกอบทางเคมีอื่นนอกจากสตาร์ชก็ส่งผลต่อคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยว โดยส่วนใหญ่ส่งผลทำให้เส้นก๋วยเตี๋ยวมีความแข็งแรง และดึงยืดได้ลดลง

ABSTRACT

The good rice noodles are made from high amylose rice. However, even though there is no difference in amylose content, the rice noodles made from different high amylose rice cultivars gives different quality. This may be attributed to the difference in chemical compositions and starch structure among rice cultivars. Therefore, the objective of this work was to study the influence of rice cultivars from 5 high amylose cultivars (Pitsanulok2, Ayutthaya1, Chai Nat1, Jek Chuey1 and Prachin Buri2) on textural properties of fresh rice noodles. The comparison between qualities of noodles made from rice flour and noodles made from rice starch was studied. Gelatinization temperature and pasting properties of Phisanulok2 was the lowest among samples. Fresh rice noodles made from Prachin Buri2 starch gave the highest firmness, tensile strength and %elongation, while Pitsanulok2 gave the lowest values. Fresh rice flour noodles provided lower firmness, tensile strength and %elongation than fresh rice starch noodles, except rice flour noodles from Phitsanulok2 which had higher tensile strength and %elongation than rice starch noodles. It could be concluded that fresh rice noodles qualities depended mainly on the properties of rice starch which was the main composition in rice noodles. However, the presence of other compositions decreased firmness and elongation of rice noodles.

Key words: rice noodles, rice cultivars, texture, starch, flour

* Corresponding author; e-mail address: **fagistt@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Food science and technology, Faculty of Agro-industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Center for Advanced Studies for Agriculture and Food, Kasetsart University, Bangkok 10900

[3]Department of Food Science & Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, Japan

คำนำ

เส้นก๋วยเตี๋ยวสดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้รับความนิยมสูงในประเทศไทย วัตถุดิบหลักของก๋วยเตี๋ยวคือข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง เนื่องจากแอมิโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดโครงสร้างเจลที่มีความแข็งแรง ซึ่งให้ความแข็งแรงแก่เส้นก๋วยเตี๋ยว (Juliano and Sakurai, 1985) ทำให้ได้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีความเหนียวนุ่ม แข็งแรง เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ดังนั้นในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว จึงมักคำนึงถึงแต่ปริมาณแอมิโลสเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามมีรายงานว่า เส้นก๋วยเตี๋ยวจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงใกล้เคียงกัน กลับมีคุณภาพแตกต่างกันทั้งในด้านเนื้อสัมผัสและคุณภาพการหุงต้ม (เสนอ, 2522 ; มรกต, 2538; Jane et al., 2018) แต่การอธิบายถึงสาเหตุของความแตกต่างดังกล่าวยังมีค่อนข้างจำกัด ซึ่งอาจเกิดได้จากความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีอื่น เช่น โปรตีน โดยพบว่าข้าวสายพันธุ์ที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะส่งผลให้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้มีความแข็งมากขึ้น (มรกต, 2538) ส่วนปริมาณไขมันและเถ้าในข้าวนั้น มีรายงานว่าไม่มีความเกี่ยวข้องกับคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยว (Fari et al., 2011) นอกจากนี้ความแตกต่างของสตาร์ชซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในข้าวแต่ละพันธุ์ก็อาจมีผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสเท่ากัน ต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสด และศึกษาถึงอิทธิพลขององค์ประกอบในข้าวได้แก่ สตาร์ชและองค์ประกอบอื่นต่อคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยวสด

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมแป้งข้าวและสตาร์ชจากแป้งข้าว

ตัวอย่างข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท1, พันธุ์พิษณุโลก2, พันธุ์อยุธยา1, และ พันธุ์ปราจีนบุรี2 ซื้อจากศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท, ศูนย์วิจัยข้าวสุโขทัย, ศูนย์วิจัยข้าวปราจีนบุรี และศูนย์วิจัยข้าวปราจีนบุรี ตามลำดับ ส่วนพันธุ์เจ๊กเชย1 ซื้อจากศูนย์ข้าวชุมชนตำบลโคกสะอาด จังหวัดสระบุรี โดยเตรียมแป้งข้าวจากข้าว 5 พันธุ์ ตามวิธีของ Sangpring et al. (2015) ดังนี้ นำข้าวเปลือกมาสีและนำข้าวขาวมาล้าง แช่น้ำในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 2 : 1 และโม่แบบเปียกด้วยเครื่อง colloid mill เหวี่ยงแยกน้ำออก นำก้อนแป้งไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด mesh number 100 และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสก่อนนำมาทดลอง

การเตรียมสตาร์ชข้าวทำตามวิธีที่ดัดแปลงจาก ณพล (2550) โดยแช่แป้งข้าวที่เตรียมได้ข้างต้นในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ในอัตราส่วนแป้ง: สารละลายคือ 2:5 นาน 3 ชั่วโมง หมุนเหวี่ยงที่ 3000 x g อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที นำตะกอนมาแช่สารละลายเบสอีกครั้ง กรองผ่านตะแกรง mesh number 200 หมุนเหวี่ยง นำตะกอนมาเติมน้ำกลั่น ปรับ pH ให้เท่ากับ 6.5-7.0 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ นำไปหมุนเหวี่ยง และขูดเอาส่วนสีเข้มด้านบนตะกอนออก ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและหมุนเหวี่ยงซ้ำ 2 ครั้ง นำสตาร์ชไปอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง และทำการบดสตาร์ชแห้ง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด mesh number 100 และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสก่อนนำมาทดลอง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ปริมาณโปรตีน ไขมัน และ เถ้า วิเคราะห์ตามวิธี AACC (1999) ส่วนปริมาณแอมิโลส วิเคราะห์ตามวิธีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน ตามวิธีของ Juliano (1971) โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวและสตาร์ชข้าว

วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyser) ตามวิธีของ Lumdubwong and Seib (2000) โดยใช้ตัวอย่างแป้งข้าวหรือสตาร์ชข้าว 2.7 กรัมน้ำหนักแห้งผสมกับน้ำกลั่น 25 กรัม ให้ความร้อนโดยกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส คงไว้ 2 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 7.5 องศาเซลเซียส/นาทีจนถึง 95 องศาเซลเซียส และคงไว้ 2 นาที แล้วจึงลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 7.5 องศาเซลเซียส/นาทีถึง 50 องศาเซลเซียสคงไว้ 4 นาที รวมระยะเวลาทั้งหมด 20 นาที บันทึกค่า อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้น (Pasting temperature), ค่าความหนืดสูงสุด (Peak Viscosity), เวลา ณ จุดที่ความหนืดสูงสุด (Peak Time),ค่าความหนืดต่ำสุด (Trough), ค่าความหนืดที่ลดลง (Breakdown), ค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้น (Setback) และ ค่าความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity) ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาทิไนเซชันของแป้งและสตาร์ชข้าว

วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ตามวิธีที่ดัดแปลงจาก ณพล (2550) ดังนี้ ชั่งน้ำหนักแป้งข้าวหรือสตาร์ชข้าว 5 มิลลิกรัม(น้ำหนักแห้ง) ลงในภาชนะอลูมิเนียมขนาด 40 ไมโครลิตร เติมน้ำปราศจากอิออนเพื่อปรับความชื้นให้เท่ากับร้อยละ 64 ปิดผนึกและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่ 25 องศาเซลเซียส นำไปสแกนในช่วง 30-130 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที บันทึกค่าอุณหภูมิเจลาทิไนเซชันต่ำสุด (T_o), อุณหภูมิเจลาทิไนเซชัน ณ จุดพีค (T_p), อุณหภูมิเจลาทิไนเซชันสูงสุด(T_c) และเอนทัลปีของการเกิดเจลาทิไนเซชัน (ΔH) ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

การเตรียมเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวและสตาร์ชข้าว

เตรียมเส้นก๋วยเตี๋ยวสดตามวิธีของ Sangpring et al. (2015) ดังนี้ ผสมแป้งข้าวหรือสตาร์ชข้าวกับน้ำให้มีความชื้นร้อยละ 64 กวนนาน 3 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำแป้ง 60 กรัมใส่ถาดแสตนเลส นึ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนาน 3 นาทีจนแผ่นแป้งสุก จะได้เส้นที่มีความหนาประมาณ 1 ± 0.1 มิลลิลิตร พักให้เย็นประมาณ 5 นาที ลอกออกจากถาด ตัดเป็นเส้นกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ได้เป็นแผ่นก๋วยเตี๋ยวสด

การวัดเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวหรือสตาร์ชข้าว

วัดความแน่นเนื้อของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวหรือสตาร์ชข้าว โดยใช้เครื่อง Texture analyzer (TA. XT. Plus, Stable Micro Systems Ltd., United Kingdom)ที่ติดตั้งโหลดเซลขนาด 50 กิโลกรัม และหัววัด A/LKB ตามสภาวะการวัดที่ดัดแปลงจาก AACC (1999) ดังนี้ วางเส้นก๋วยเตี๋ยวสด 3 เส้นบนฐานวัด ตั้งค่าความเร็วหัววัดช่วงก่อนการวัดเท่ากับ 1.0 มม./วินาที, ความเร็วขณะทำการวัด 0.2 มม./วินาที และความเร็วหลังการวัด 10.0 มม./วินาที โดยให้หัววัดกดตัวอย่างลงไปเท่ากับ 70%strain บันทึกค่าแรงกดสูงสุดและคำนวณเป็น ค่าความแน่นเนื้อ (กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) โดยวัดทั้งหมดอย่างน้อย 10 เส้น ต่อการวัด 1 ซ้ำ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

ส่วนการวัดการดึงยืดนำเส้นก๋วยเตี๋ยวพันกับหัววัด A/SPR และใช้สภาวะในการวัดตาม Stable Micro Systems LTD (1995) โดยใช้โหลดเซลขนาด 5 กิโลกรัม ตั้งค่าความเร็วหัววัดช่วงก่อนการวัดเท่ากับ 3.0 มม./วินาที , ความเร็วขณะทำการวัด 3.0 มม./วินาที และความเร็วหลังทำการวัด 5.0 มม./วินาที ระยะเคลื่อนที่ของหัววัดเป็น 100 มม. บันทึกค่าแรงดึงสูงสุดและระยะทาง แล้วคำนวณเป็นค่าแรงที่ใช้ในการดึงยืดสูงสุด (กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) และร้อยละการดึงยืด ตามลำดับ โดยวัดทั้งหมดอย่างน้อย 10 เส้น ต่อการวัด 1 ซ้ำ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

ผลการทดลองและวิจารณ์

องค์ประกอบทางเคมี

แป้งข้าวจากทั้ง 5 พันธุ์มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8.25-9.20 มีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 29.60- 31.33 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างพันธุ์ ($p > 0.05$) ส่วนปริมาณโปรตีนของแป้งข้าวพันธุ์อยุธยา 1 สูงที่สุดคือร้อยละ 9.23 ± 0.13 ส่วนพันธุ์พิษณุโลก2 นั้นมีปริมาณโปรตีนที่ต่ำที่สุด (ร้อยละ 7.15 ± 0.03) ส่วนแป้งพันธุ์ชัยนาท1 เจ๊กเชย1 และปราจีนบุรี2 มีปริมาณโปรตีน 8.04 ± 0.04, 7.72 ± 0.03 และ 8.59 ± 0.04 ตามลำดับ ปริมาณไขมันในแป้งข้าวพันธุ์พิษณุโลก2 มีมากที่สุดคือร้อยละ 0.22 ± 0.00 ส่วนพันธุ์อยุธยา1 ชัยนาท1 เจ๊กเชย1 และปราจีนบุรี2 มีปริมาณไขมัน 0.18 ± 0.01, 0.14 ± 0.02, 0.18 ± 0.00 และ 0.18 ± 0.00 ตามลำดับ ปริมาณเถ้านั้นไม่มีความแตกต่างกัน โดยมีค่าในช่วงร้อยละ 0.22-0.25 ส่วนสตาร์ชจากข้าวทั้ง 5 พันธุ์มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8.79-9.54 ปริมาณแอมิโลสตั้งแต่ 33.53-35.00 โดยที่ปริมาณแอมิโลส โปรตีน ไขมันและเถ้าในสตาร์ชระหว่างพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

คุณสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชข้าวและแป้งข้าว

สตาร์ชข้าวพันธุ์พิษณุโลก2 มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาทิไนเซชันต่ำที่สุด (T_o) แต่สตาร์ชข้าวพันธุ์ชัยนาท1 มีค่าดังกล่าวสูงที่สุด การที่สตาร์ชมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันแตกต่างกันอาจเนื่องจากความแตกต่างของขนาดโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพคทิน โดยมีรายงานว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชข้าวมีความสัมพันธ์กับความยาวของโมเลกุลแอมิโลเพคทิน โดยกลุ่มแอมิโลเพคทินสายสั้น (DP = 6-9) ทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชข้าวลดลง (Vandeputte et al., 2003; Li et al., 2004) จากรายงานของน้ำฝน (2557) ข้าวพันธุ์พิษณุโลก2 มีสัดส่วนของแอมิโลเพคทินสายสั้นมากกว่าข้าวพันธุ์อยุธยา1, ชัยนาท1 และ ปราจีนบุรี2 จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า T_o ของพิษณุโลก2 ต่ำที่สุด ส่วนค่าเอนทัลปี (ΔH) หรือพลังงานที่ต้องใช้ในการทำลายผลึกของสตาร์ชพันธุ์ชัยนาท1 สูงที่สุดแสดงถึงการมีปริมาณผลึกมากที่สุด อุณหภูมิของการเกิดเจลาทิไนเซชันของแป้งข้าวมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างสตาร์ชและความแตกต่างในแต่ละพันธุ์มีแนวโน้มเช่นเดียวกับในตัวอย่างสตาร์ช

Table 1 Thermal properties of rice starch and rice flour.

Sample	Vareities	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH(J/g starch)	T_c-T_o
Starch	Phitsanulok2	59.41 ± 0.45^d	65.32 ± 0.15^e	71.28 ±0.25^d	7.87 ± 0.30^c	11.87 ± 0.63^{ab}
	Ayutthaya 1	68.66 ± 0.32^c	74.18 ± 0.27^c	80.10 ±0.39^b	10.72 ± 0.60^{ab}	11.44 ± 0.46^{ab}
	Chainat1	71.07 ± 0.15^a	75.59 ± 0.10^a	81.20 ±0.28^a	12.89 ± 0.78^a	10.13 ± 0.38^c
	Jekchuey1	68.51 ± 0.03^c	73.21 ± 0.08^d	79.23 ±0.49^c	10.25 ± 0.99^b	10.72 ± 0.50^{bc}
	Prachinburi 2	69.49 ± 0.42^b	75.18 ± 0.21^b	81.84 ±0.86^a	11.57 ± 0.88^{ab}	12.35 ± 1.28^a
Sample	**Vareities**	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH(J/g starch)	T_c-T_o
Flour	Phitsanulok2	59.40 ± 0.25^d	65.68 ± 0.15^d	72.91 ± 0.36^b	7.52 ± 0.48^d	13.51 ± 0.58^a
	Ayutthaya 1	69.55 ± 0.43^b	74.68 ± 0.33^b	81.05 ± 0.70^a	9.27 ± 0.97^{bc}	11.50 ± 0.93^b
	Chainat1	71.25 ± 0.21^a	75.94 ± 0.33^a	81.32 ± 0.87^a	10.64 ± 0.35^a	9.93 ± 0.82^b
	Jekchuey1	68.69 ± 0.22^c	73.60 ± 0.33^c	79.89 ± 0.65^a	10.17 ± 0.79^{ab}	11.20 ± 0.43^b
	Prachinburi 2	69.52 ± 0.24^b	74.71 ± 0.15^b	80.62 ± 1.11^a	8.51 ± 0.18^{cd}	11.10 ± 1.35^b

Means within a column under each sample, means followed by a same letter are not significantly difference ($p > 0.05$)

สมบัติความหนืดของแป้งข้าวและสตาร์ชข้าว

อุณหภูมิเริ่มต้นของความหนืดของสตาร์ชข้าวพันธุ์ชัยนาท1 สูงที่สุดและพันธุ์พิษณุโลก2 ต่ำที่สุด สอดคล้องกับอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (Table 1) สตาร์ชข้าวพันธุ์เจ๊กเชย1 มีค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้น ความหนืดสุดท้ายสูงที่สุด บ่งบอกถึงความสามารถของสตาร์ชในการเกิดเจลที่แข็งแรง (Falade and Christopher, 2015; Mir and Bosco, 2014) และมีรายงานว่าค่าความหนืดสุดท้ายและความหนืดที่เพิ่มขึ้น สัมพันธ์เชิงบวกกับความแน่นแข็ง แรงที่ใช้ในการดึงยืดและความยืดหยุ่นของอาหารเส้น (Han et al., 2011; Fari et al., 2011; Tang et al., 2013) ดังนั้นจึงคาดว่าคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ชข้าวพันธุ์เจ๊กเชย1 น่าจะมีความแน่นเนื้อสูงสุด ดึงยืดได้ดี ส่วนสตาร์ชข้าวพันธุ์พิษณุโลก2 มีค่าความหนืดต่ำที่สุดในทุกค่า จึงคาดว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวน่าจะมีความแข็งแรงต่ำ ดึงยืดได้ไม่ดี เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างสตาร์ชและแป้งข้าว (Figure 1) พบว่าตัวอย่างแป้งข้าวส่วนใหญ่มีค่าความหนืดน้อยกว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าว อาจเป็นเพราะในแป้งข้าวมีองค์ประกอบอื่นเช่น โปรตีนและไขมันซึ่งขัดขวางการดูดน้ำและการพองตัว โมเลกุลสตาร์ชจึงออกมาจากแกรนูลของสตาร์ชได้ไม่ดี เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลสได้ไม่ดีเท่าในสตาร์ช (มรกต, 2538; Marcoa and Rosell 2008; Yu et al., 2012)

แป้งข้าวพันธุ์พิษณุโลก2 มีสมบัติด้านความหนืดต่ำที่สุดเช่นเดียวกับตัวอย่างสตาร์ช ส่วนแป้งข้าวพันธุ์อยุธยา1 มีค่าความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้นจากในสตาร์ชซึ่งอาจเกิดจากโปรตีนหรือไขมันที่อยู่ในแป้งข้าวพันธุ์อยุธยา 1 สามารถเกิดปฏิสัมพันธ์กับโมเลกุลสตาร์ช (Mir and Bosco, 2014) จึงทำให้ค่าความหนืดของแป้งข้าวพันธุ์อยุธยา1 เพิ่มสูงขึ้น

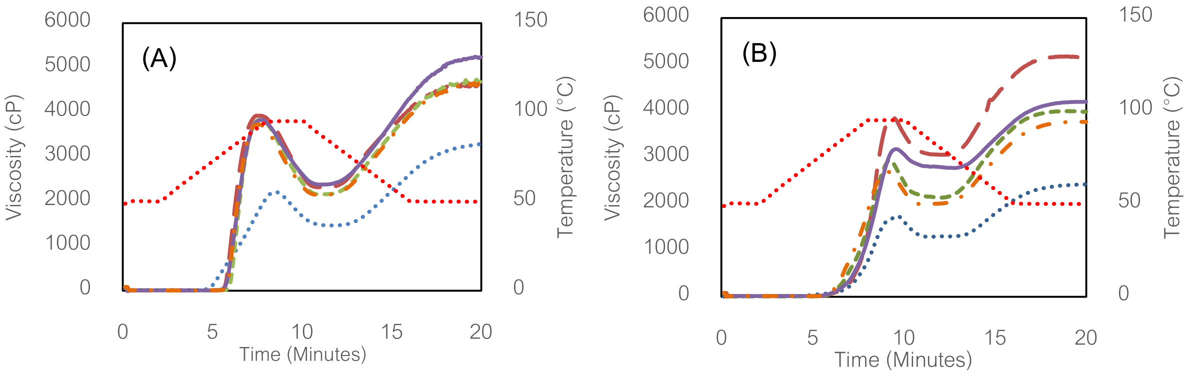


Figure 1 Pasting properties of rice starch (A) and rice flour (B) from various rice vareities
Phitsanulok2, Ayutthaya 1, Chainat1, Jekchuey1, Prachinburi2

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสด

จาก Table 2 เมื่อพิจารณาค่าความแน่นเนื้อและร้อยละการดึงยืดพบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ชข้าวพันธุ์พิษณุโลก2 และอยุธยา1 มีความแน่นเนื้อต่ำ ดึงยืดได้ค่อนข้างน้อย และขาดง่าย ส่วนเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ชข้าวพันธุ์ชัยนาท1 มีความแข็งปานกลาง มีความยืดหยุ่นปานกลาง ส่วนเส้นก๋วยเตี๋ยวจากสตาร์ชข้าวพันธุ์เจ๊กเชย1 นั้นมีความแน่นเนื้อค่อนข้างสูง เส้นแข็ง ยืดหยุ่นมาก ส่วนเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ชข้าวพันธุ์ปราจีนบุรี2 นั้นเป็นเส้นที่มีความแข็งแรง มีค่าความแน่นเนื้อสูงสุด ยืดหยุ่นได้ดีมาก เส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากข้าวพันธุ์พิษณุโลก2 มีความแน่นเนื้อ แรงที่ใช้ในการดึงยืดและร้อยละการดึงยืดต่ำที่สุด สอดคล้องกับค่าความหนืด

สุดท้ายและความหนืดที่เพิ่มขึ้นที่ต่ำที่สุด เนื่องจากการมีความหนืดสูงสุดต่ำที่สุดแสดงว่าแกรนูลของสตาร์ชจากข้าวพันธุ์พิษณุโลก2 อาจพองตัวได้น้อย โมเลกุลของสตาร์ชจึงหลุดออกมาจากแกรนูลได้น้อย ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันได้ไม่แข็งแรงเส้นก๋วยเตี๋ยวจึงมีความอ่อนแอ เมื่อเปรียบเทียบกับการทำนายเนื้อสัมผัสจากผลด้านสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชข้าวพันธุ์ต่างๆกับค่าเนื้อสัมผัสที่วัดได้จริงพบว่า เส้นก๋วยเตี๋ยวจากสตาร์ชข้าวพันธุ์พิษณุโลก2 และ เจ๊กเชย1 ค่อนข้างสอดคล้องกับเนื้อสัมผัสที่ทำนายจากสมบัติทางความหนืด อย่างไรก็ตาม สตาร์ชข้าวพันธุ์อยุธยา1 ปราจีนบุรี2 และ ชัยนาท1 ถึงแม้ว่าจะมีสมบัติทางความหนืดใกล้เคียงกัน กลับมีความแตกต่างด้านเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ช ซึ่งคาดว่าอาจมาจากความแตกต่างของโครงสร้างละเอียดของสตาร์ช

เมื่อมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นอยู่กับสตาร์ช เส้นก๋วยเตี๋ยวทุกพันธุ์ยกเว้นพิษณุโลก2 จะมีค่าความแน่นเนื้อ แรงที่ใช้ในการดึงยืดและร้อยละการดึงยืดลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ชข้าว อาจเป็นเพราะการพองตัวของเม็ดสตาร์ชน้อยลง (Figure 1) ทำให้โมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ในแกรนูลอาจจะออกมาจากเม็ดสตาร์ชด้านนอกได้น้อย และอาจจะมีองค์ประกอบอื่นไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโครงสร้างสตาร์ชประกอบกับปริมาณของสตาร์ชในระบบแป้งจะน้อยกว่าระบบที่มีเฉพาะสตาร์ชจึงอาจทำให้เกิดโครงสร้างของเส้นก๋วยเตี๋ยวที่อ่อนแอลง (Puncha-arnon & Uttapap, 2013; Mir and Bosco, 2014) อย่างไรก็ตามในข้าวพันธุ์พิษณุโลก 2 เส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวมีแรงที่ใช้ในการดึงยืด และร้อยละในการดึงยืดมากกว่ากว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ชข้าว (Table 2) แสดงว่าองค์ประกอบอื่นเช่น โปรตีน อาจเกิดปฏิสัมพันธ์กับสตาร์ช ทำให้โครงสร้างของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวแข็งแรงขึ้น จึงทำให้เส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวนั้นเกิดโครงสร้างที่ดึงยืดได้ดี มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองด้านเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวของข้าวแต่ละพันธุ์มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับในตัวอย่างเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ชข้าวแต่ละพันธุ์ จึงอาจสรุปได้ว่าเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวจากแป้งข้าวนั้นมีอิทธิพลหลักมาจากสตาร์ช เนื่องจากสตาร์ชนั้นเป็นองค์ประกอบหลักและเป็นโครงสร้างหลักของเส้นก๋วยเตี๋ยว อย่างไรก็ตามการที่มีองค์ประกอบอื่นอยู่ร่วมกับสตาร์ช ได้แก่โปรตีน และ ไขมัน นั้นส่งผลต่อคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวแต่ละพันธุ์แตกต่างกัน โดยมีทั้งช่วยส่งเสริมความแข็งแรงให้กับเส้นก๋วยเตี๋ยวสด ทำให้โครงสร้างสามารถเกิดการดึงยืดได้ดี หรือมีผลในการลดความแข็งแรงของเส้นก๋วยเตี๋ยวสด มีความยืดหยุ่นน้อยลง ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาในประเด็นเหล่านี้ต่อไป

Table 2 Textural properties of fresh rice noodle from rice starch and rice flour.

Vareities	Firmness (kPa)		Tensile strength (kPa)		%elongation	
	Flour	Starch	Flour	Starch	Flour	Starch
Phitsanulok2	279.7 ± 7.8^{aB}	308.4 ± 7.8^{dA}	65.7 ± 3.5^{aA}	46.9 ± 0.8^{cB}	82.18 ± 4.12^{dA}	66.61 ± 0.99^{dB}
Ayutthaya1	234.3 ± 21.1^{bcB}	302.6 ± 6.4^{dA}	47.7 ± 1.4^{cA}	48.0 ± 0.5^{cA}	81.61 ± 2.08^{dB}	92.86 ± 4.73^{cA}
Chainat1	212.9 ± 6.4^{cB}	331.6 ± 1.6^{cA}	49.1 ± 0.7^{bcB}	58.8 ± 0.3^{bA}	106.24 ± 5.36^{bB}	117.20 ± 3.05^{bcA}
Jekchuey1	258.1 ± 15.7^{abB}	363.6 ± 7.3^{bA}	49.0 ± 1.1^{bcB}	63.5 ± 3.4^{bA}	93.59 ± 2.92^{cB}	140.14 ± 10.50^{abA}
Prachinburi2	273.5 ± 13.6^{aB}	440.6 ± 3.4^{aA}	52.5 ± 0.9^{bB}	70.0 ± 5.6^{aA}	128.13 ± 4.11^{aA}	143.58 ± 25.02^{aA}

Means within a column under each factor, means followed by a same small letter are not significantly difference ($p > 0.05$)

Means within a row under each factor, means followed by a same capital letter are not significantly difference ($p > 0.05$)

สรุป

แม้ว่าข้าวแต่ละพันธุ์ในงานวิจัยนี้จะมีปริมาณแอมิโลสไม่แตกต่างกัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืด อุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลาทิไนเซชันที่แตกต่างกัน และเมื่อนำมาผลิตเป็นเส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากสตาร์ช และแป้งข้าวจะให้คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวที่แตกต่างกัน เส้นก๋วยเตี๋ยวสดจากแป้งข้าวส่วนใหญ่มีแนวโน้มระหว่างพันธุ์ข้าวนั้นคล้ายคลึงกับเส้นจากสตาร์ช แต่จะมีความแน่นเนื้อ แรงที่ใช้ในการดึงยืดและร้อยละการดึงยืดลดลงจากเส้นก๋วยเตี๋ยวจากสตาร์ช ในทางกลับกันในบางพันธุ์พบว่ามีคุณภาพทางเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างในตัวอย่างเส้นที่ทำจากแป้งข้าวพันธุ์ต่างๆนั้น มาจากอิทธิพลของคุณสมบัติของสตาร์ชเป็นหลัก แต่การมีองค์ประกอบอื่นอยู่ในเส้นร่วมกับสตาร์ช ก็ส่งผลถึงเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสดในทิศทางที่ต่างกันไป โดยอาจเพิ่มความแข็งแรงให้กับเส้นก๋วยเตี๋ยว หรืออาจขัดขวางโครงสร้างของเส้น ทำให้เส้นอ่อนแอลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนจากเงินทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2558 และ ศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหาร

เอกสารอ้างอิง

ณพล พงษ์ไพโรจน์. 2550. **ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างละเอียดของสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูงและสมบัติทางกลของสตาร์ชฟิล์ม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

น้ำฝน ลำดับวงศ์. 2557. **การวิเคราะห์แป้งและสตาร์ชดัดแปร องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะเฉพาะ และสมบัติเชิงหน้าที่.** ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ

มรกต ตุลพงศารักษ์. 2538. **พันธุ์ข้าว ระยะเวลาการเก็บข้าวเปลือก และเนื้อดินที่ใช้ปลูกข้าว ที่มีผลต่อคุณภาพเส้นก๋วยเตี๋ยว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เสนอ ร่วมจิต. 2522. ศึ**กษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของข้าวเจ้าพันธุ์ต่าง ๆที่มีผลลักษณะของเส้นก๋วยเตี๋ยว.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

AACC. 1999. **Official methods of analysis.** 20^{th}ed. Virginia, U.S.A: The American Association of Cereal Chemists

Falade, K.O. and A.S. Christopher. 2015. Physical, functional, pasting and thermal properties of flours and starches of six Nigerian rice cultivars. **Food Hydrocolloids.** 44: 478-490

Fari, M.J.M., D. Rajapoksa and K.K.D.S. Ranaweera. 2011. Quality characteristics of noodles made from selected varieties of Sri Lankan rice with different physicochemical characteristics. **Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka.** 39: 53-60.

Fradinho, P., I. Sousa and A. Raymundo. 2018. Functional and thermorheological properties of rice flour gels for gluten-free pasta applications. **International Journal of Food Science and Technology:** 1-12

Han, H.M., J.H. Cho and B.K. Koh. 2011. Processing properties of Korean rice varieties in relation to rice noodle quality. **Food Science Biotechnology**. 20: 1277-1282.

Likitcholatarn, J., P. Ritthiruangdej, P. Rumpagaporn, N. Lumdubwong and S. Ratanasumawong. 2018. Effect of mixed high amylose rice flour on pasting properties and texture of rice noodles. **Journal of Food Science and Agricultural Technology**. 4: 53-58.

Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. **Cereal Science Today**. 16: 334-340

_______. and J. Sakurai. 1985. Miscellaneous rice products. In B.O. Juliano(Ed). **Rice: Chemistry and Technology**: 569-618.

Lumdubwong, N., P.A. Seib. 2000. Rice starch isolation by alkaline protease digestion of wet-milled rice flour.. **Journal of Cereal Science.** 31: 63-74

Marcoa, C. and C M. Rosell. 2008. Effect of different protein isolates and transglutaminase on rice flour properties. **Journal of Food Engineering.** 84: 132-139.

Mir, S.A. and S.J.D. Bosco. 2014. Cultivar difference in physicochemical properties of starches and flours from temperate rice of Indian Himalayas. **Food Chemistry**. 157: 448-456.

Sangpring, Y., M. Fukuoka and S. Ratanasumawong. 2015. The effect of sodium chloride on microstructure, water migration, and texture of rice noodle. **LWT - Food Science and Technology**. 64: 1107-1113.

Tang, M., Y., Hong, Z., Gu, Y., Zhang, and X. Cai, 2013. The effect of xanthan on short and long term retrogradation of rice starch. **Starch/Starke**. 64: 702-708.

Vandeputte, G.E., R. Vermeylen, J. Geeroms and J.A. Delcour. 2003a. Rice starches. I. Structural aspects provide insight into crystallinity characteristics and gelatinisation behaviour of granular starch. **Journal of Cereal Science**. 38 (1): 43-52.

Varavinit, S., S. Shobsngob., W. Varanyanond, P. Chinachoti and O. Naivikul. 2003. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation and pasting properties of flours from different cultivars of Thai rice. **Starch/ Stärke.** 55: 410-415.

Zhou, Z.K., Robards, K., S. Helliwell and C. Blanchard. 2002. Composition and functional properties of rice. **International Journal of Food Science and Technology**.37: 849-868.

อิทธิพลของวงสังคมใกล้ชิดที่มีต่อความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายในกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวาย

Effect of Inner Circle on the Intention to Buy Facial Care Products for Men of Generation Y Metrosexual Consumers

ศิรประภา ผ่องบุรุษ[1*] วัชรพงศ์ เลิศสุรวัฒน์[1] และ อัจฉรา เกษสุวรรณ[1]

Siraprapha Phongburoose[1*] Watcharaphong Leartsurawat[1] and Ajchara Kessuvan[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายในกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวาย โดยพิจารณาอิทธิพลของบุคคลในวงสังคมใกล้ชิด (Inner circle) บุคคลในวงสังคมทั่วไป (Outer circle) ปัจจัยด้านทัศนคติของกลุ่มผู้ชายยุคใหม่ (Metrosexual) และปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด โดยใช้การสัมภาษณ์เชิงลึกร่วมกับการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถาม ผลการทดสอบสมมติฐานโดยการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณพบว่า ข้อคิดเห็นของบุคคลในวงสังคมใกล้ชิดระหว่างการตัดสินใจเลือกซื้อมีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อความสนใจที่จะซื้อ ในขณะที่ปัจจัยจากบุคคลในวงสังคมทั่วไปไม่มีอิทธิพล ปัจจัยอื่นที่มีความสัมพันธ์เชิงบวก ได้แก่ การให้ความสำคัญกับภาพลักษณ์ของตน การทำให้ตนเองดูดีอยู่เสมอ ผลิตภัณฑ์มีคุณประโยชน์ตามที่ระบุ ราคาเหมาะสมกับคุณภาพ และการส่งเสริมภาพลักษณ์ของแบรนด์ ส่วนปัจจัยระดับราคาที่สามารถซื้อได้ มีความสัมพันธ์ผกผันกับความสนใจที่จะซื้อ ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางพัฒนากลยุทธ์การสื่อสารทางการตลาดให้เหมาะสมกับกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวาย ซึ่งเป็นกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายที่มีลักษณะเฉพาะตัวและมีศักยภาพในการซื้อสูง

ABSTRACT

This research investigates factors that influence intention to buy facial care products for men of generation Y metrosexual consumers by considering inner circle, outer circle, personal attitudes and marketing mix. In-depth interviews were conducted and tasted by multiple regression analysis using data collected from questionnaires. The finding results revealed that there was a relationship between comments from inner circle and the intention to buy while outer circle had no relationship. Other factors that affect intention to buy are self-image conscious, keeping good look, effectiveness of product, reasonable price and brand image. However, affordable price factor has an inverse relationship. This study can be used as a guideline to develop appropriate marketing strategies for the distinct characteristics generation Y metrosexual consumers who are high potential target group.

Key words: social circle, inner circle, intention to buy, metrosexual, facial care products for men

* Corresponding author; e-mail address: siraprapha.pho@ku.th

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

อุตสาหกรรมเครื่องสำอางในประเทศไทยมีแนวโน้มเติบโตขยายตัวต่อเนื่อง (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2561) เนื่องจากในปัจจุบันผู้บริโภค มีลักษณะการดำเนินชีวิตที่เปลี่ยนไป มีการคำนึงถึงบุคลิกภาพมากขึ้น อีกทั้งการแผ่ขยายของสังคมเมืองทำให้ผู้บริโภคมีวงสังคมของตนเองทำให้เกิดความตระหนักในการใส่ใจในภาพลักษณ์ของตน มีความต้องการดูแลตนเองมากขึ้น มีพฤติกรรมการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ที่ช่วยเพิ่มบุคลิกให้ดูดีมากขึ้นกว่าในอดีต เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ตลาดเครื่องสำอางในปัจจุบันรวมถึงตลาดเครื่องสำอางสำหรับผู้ชายมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ในบทความของ Forbes Thailand (2019) มีการคาดการณ์ว่า ยอดขายเครื่องสำอางผู้ชายเติบโตไปในทิศทางเดียวกับกลุ่มผลิตภัณฑ์ดูแลผิวสำหรับผู้ชายที่จะเติบโตขึ้นร้อยละ 24 ใน 5 ปีข้างหน้า ส่งผลให้ผู้ผลิตเครื่องสำอางรายใหญ่มีการเร่งพัฒนาผลิตภัณฑ์สำหรับผู้ชายมากขึ้น ประกอบกับผู้บริโภคในยุคปัจจุบันสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีได้โดยง่าย ทำให้เกิดการติดต่อสื่อสารผ่านช่องทางสื่อสังคมออนไลน์ (Social Media) อย่างกว้างขวาง สอดคล้องกับบทความของ อรรคณัฐ (2562) ที่ระบุว่า สื่อสังคมออนไลน์ดังกล่าวก่อให้เกิดบริบทการเปรียบเทียบทางสังคมและความต้องการการเป็นที่ยอมรับ ซึ่งก่อให้เกิดแรงบันดาลใจ (Motivation) ให้พัฒนาตนเอง (Self-enhancement) และก่อให้เกิดความรู้สึกชื่นชม ภาคภูมิใจในตนเอง (Self-esteem)

ทั้งนี้ยังมีปรากฏการณ์ในเรื่องของผู้ชายยุคใหม่ หรือ ผู้ชายเมโทรเซ็กชวล (Metrosexual) ซึ่งเกิดขึ้นมากในแถบภูมิภาคเอเชีย (Whitehead, 2008) และ Rytel (2010) ได้ทำการค้นคว้างานวิจัยในอดีตพบว่า ผู้บริโภคมีแนวโน้มดูแลตัวเองและใช้ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางเพิ่มมากขึ้น โดยปกติแล้วผู้ชายจะเลือกใช้เครื่องสำอางหรือผลิตภัณฑ์บำรุงผิวที่แก้ปัญหาเฉพาะจุด ซึ่งเป็นการตัดสินใจโดยใช้เหตุผล (Rational) แต่ผู้ชายยุคใหม่มีการใช้อารมณ์เข้ามาเกี่ยวข้องในการตัดสินใจ (Hyperreality) ภาพลักษณ์ของตราสินค้า หรือผลิตภัณฑ์ กลายเป็นส่วนหนึ่งในการตัดสินใจซื้อสินค้าหรือบริการ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่คณะผู้วิจัยได้จากการสัมภาษณ์เชิงลึกกับกลุ่มผู้ชายยุคใหม่ Sukato and Elsey (2009) ระบุว่ามุมมองของผู้ชายในปัจจุบันต่างไปจากเดิม โดยให้คุณค่ากับสถานะทางสังคมมากกว่าอาชีพการงาน มีความต้องการภาพลักษณ์ที่ดี และการได้รับยอมรับจากคนรอบข้าง วิภาวัส (2557) พบว่าในปัจจุบันผู้บริโภครวมถึงคนรอบตัวที่เป็นกลุ่มอ้างอิง (Normative influence) เช่น เพื่อนและครอบครัว สามารถรับรู้ถึงอิทธิพลของภาพลักษณ์ที่ดีจากการใช้เครื่องสำอาง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoh *et al.* (2003) ซึ่งระบุว่าเพื่อนและครอบครัว มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ของผู้ชาย นอกจากนี้กลุ่มผู้ชายยุคใหม่ ยังมี คุณลักษณะที่เกี่ยวเนื่องกับคุณลักษณะของกลุ่มประชากรเจเนอเรชันวาย (Generation Y) ที่มีความทันสมัย มีความเป็นตัวของตัวเอง ชอบแสดงออก มีความคาดหวังสูง และเริ่มมีกำลังซื้อที่จะสามารถสร้างภาพลักษณ์ที่ดีให้กับตนได้ (มันตาภรณ์, 2559)

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นพบว่าสถานการณ์การเติบโตของตลาดเครื่องสำอางโดยเฉพาะกลุ่มผลิตภัณฑ์ดูแลผิวสำหรับผู้ชาย และปรากฏการณ์การเกิดขึ้นของกลุ่มผู้ชายยุคใหม่รุ่นเจเนอเรชันวาย เป็นโอกาสอย่างสูงทางธุรกิจในยุคปัจจุบัน อย่างไรก็ดีงานวิจัยในอดีตยังขาดการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความสนใจที่

จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายในกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวาย จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ โดยมีวัตถุประสงค์ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายในกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวาย โดยพิจารณาอิทธิพลของบุคคลในวงสังคมใกล้ชิด บุคคลในวงสังคมทั่วไป ปัจจัยด้านทัศนคติของกลุ่มผู้ชายยุคใหม่ และปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด

วิธีการวิจัย / ระเบียบวิธีวิจัย

ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยแบบผสม เนื่องจากงานวิจัยด้านวงสังคมส่วนบุคคลที่ส่งผลต่อความสนใจซื้อมีอยู่น้อย คณะผู้วิจัยจึงใช้การวิจัยเชิงคุณภาพโดยการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview) กับผู้ชายที่อยู่ในรุ่นเจเนอเรชันวายและเคยใช้ผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชาย จำนวน 10 คน เพื่อระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสนใจที่จะซื้อในเบื้องต้น ในส่วนของการวิจัยเชิงปริมาณคณะผู้วิจัยใช้วิธีการเก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถาม โดยขอบเขตของการวิจัยคือ มุ่งศึกษาประชากรเพศชายที่มีลักษณะการดำเนินชีวิตแบบ “ผู้ชายยุคใหม่” โดยกำหนดความหมายดังนี้ “ผู้ชายที่อาศัยอยู่ในสังคมเมือง มีการดูแลเอาใจใส่ตนเอง ให้ความสำคัญกับรสนิยมการใช้ชีวิต มีทักษะในการดูแลตัวเอง มีความสามารถในการเลือกเสื้อผ้าเครื่องแต่งกายให้เหมาะกับตนเองและสถานการณ์ มีความเป็นตัวของตัวเอง เป็นคนทันสมัย สามารถรับรู้ได้ถึงการเปลี่ยนแปลง สนใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีใหม่ๆ ชอบเรียนรู้ และพัฒนาตนเอง มีความทุ่มเทในการทำงานเพื่อประสบความสำเร็จ” และเป็นเจเนอเรชันวายกล่าวคือ มีอายุระหว่าง 22 ถึง 39 ปี โดยกลุ่มตัวอย่างถูกเลือกโดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบจำเพาะเจาะจง (Purposive sampling) โดยการวิจัยนี้เลือกเก็บข้อมูลเฉพาะจากกลุ่มตัวอย่างที่มีคุณลักษณะตรงกับผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวายเท่านั้น

กรอบแนวคิดการวิจัย

จากการทบทวนวรรณกรรมประกอบกับข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์เชิงลึก คณะผู้วิจัยได้พัฒนากรอบแนวคิดการวิจัย โดยตั้งสมมุติฐานว่า ปัจจัยวงสังคมส่วนบุคคล ได้แก่ วงสังคมส่วนบุคคลใกล้ชิด (Inner circle) และ วงสังคมส่วนบุคคลทั่วไป (Outer circle) ประกอบกับปัจจัยทัศนคติส่วนบุคคล และปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด มีความสัมพันธ์กับความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชาย โดยสามารถแสดงกรอบการวิจัยในแผนภาพที่ 1 ดังนี้

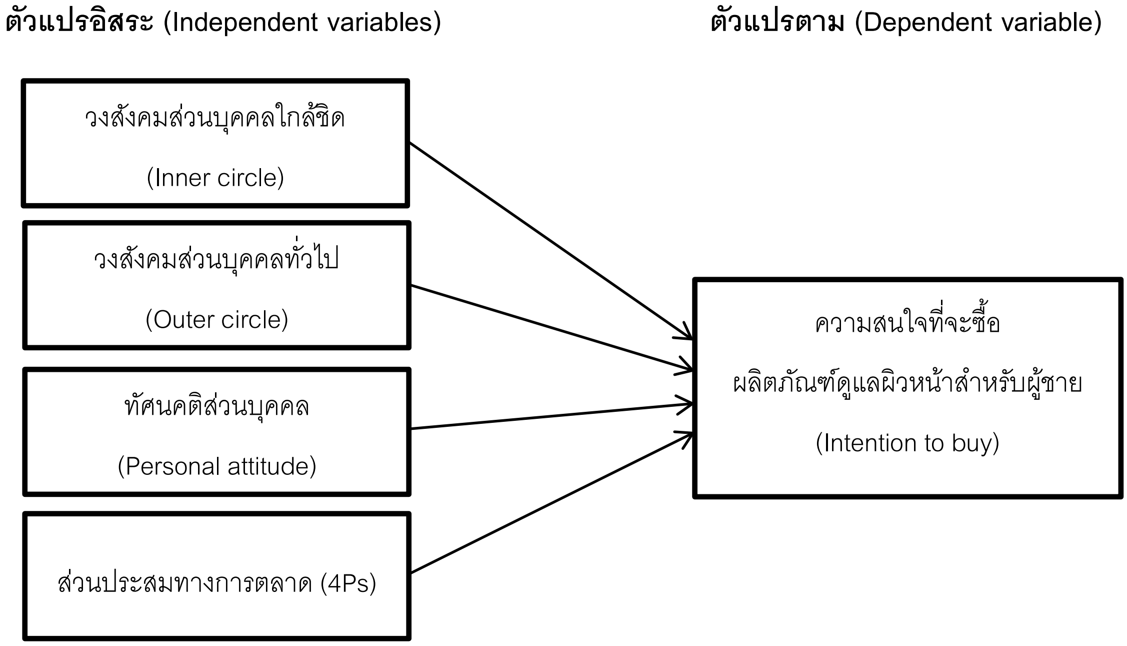


Figure 1 Conceptual framework

การสัมภาษณ์เชิงลึกและแบบสอบถาม

คณะผู้วิจัยได้ทำการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview) ร่วมกับการสังเกตพฤติกรรมผู้ชายยุคใหม่รุ่นเจเนอเรชันวาย จำนวน 10 คน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงต่อคน เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมการใช้และเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชาย รวมถึงปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมดังกล่าว จากนั้นจึงพัฒนาเป็นแบบสอบถามโดยสังเคราะห์ผลการสัมภาษณ์เชิงลึกร่วมกับผลการทบทวนวรรณกรรม เพื่อนำมาใช้เก็บข้อมูลในส่วนของการวิจัยเชิงปริมาณ ซึ่งตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีลักษณะเป็นสเกล โดยมีการใช้การสุ่มตัวอย่างแบบจำเพาะเจาะจง (Purposive sampling) เพื่อให้ได้ข้อมูลจากกลุ่มเป้าหมายเฉพาะกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวายซึ่งเคยใช้ผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชาย ผลจากการเก็บข้อมูลมีผู้ตอบแบบสอบถามจำนวน 313 คน ในเขตกรุงเทพและปริมณฑล รวมถึงหัวเมืองใหญ่ เมื่อทำการคัดกรองแบบสอบถามและตรวจสอบข้อมูลแล้ว มีแบบสอบถามที่ผ่านเกณฑ์จำนวน 229 ชุด

การวิเคราะห์ข้อมูลและแปลความหมายของข้อมูล

ก่อนทำการเก็บข้อมูลจริงคณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ (Reliability) ของแบบสอบถาม โดยการทดสอบแบบสอบถามก่อนเก็บข้อมูลจริง (Pretest) จำนวน 45 ชุด โดยใช้วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์อัลฟ่าของครอนบัค (Cronbach’s alpha coefficient) ผลการทดสอบตัวแปรที่เป็นสเกลพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์อัลฟ่าของครอนบัคมากกว่า 0.7 จึงสามารถถือได้ว่าแบบสอบถามมีความเชื่อถือได้ นอกจากนี้ในแบบสอบถามมีการเก็บข้อมูลเชิงพฤติกรรมการดำเนินชีวิต พฤติกรรมในการซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชาย และข้อมูลด้านประชากรศาสตร์ การทดสอบสมมุติฐานใช้การวิเคราะห์สถิติเชิงอนุมาน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัว

แปรอิสระ (Independent variables) และตัวแปรตาม (Dependent variable) โดยตัวแปรอิสระในการศึกษานี้มีมากกว่าหนึ่งตัวและมีตัวแปรตามหนึ่งตัว คณะผู้วิจัยได้ทดสอบข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติแล้วพบว่าผ่านเงื่อนไขของการใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ จึงเลือกใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) และใช้วิธีการถดถอยแบบขั้นตอน (Stepwise regression) เนื่องจากเป็นวิธีที่ช่วยระบุตัวแปรสำคัญให้มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม และคณะผู้วิจัยเห็นว่ามีความเหมาะสมกับข้อมูล

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา พบว่าข้อมูลจากกลุ่มเป้าหมายจำนวนทั้งสิ้น 229 คน มีลักษณะการดำเนินชีวิตตรงกับคำจำกัดความของผู้ชายยุคใหม่ มีอายุระหว่าง 22 ถึง 39 ปี ซึ่งอยู่ในช่วงอายุของกลุ่มเจเนอเรชันวาย โดยส่วนใหญ่มีการศึกษาระดับปริญญาตรีขึ้นไปและมีรายได้เฉลี่ยต่อเดือน 15,000 ถึง 30,000 บาท ประกอบอาชีพพนักงานบริษัทเอกชน มีสถานภาพด้านความรักคืออยู่ในช่วงมีความรักและเป็นโสด มักอาศัยอยู่กับคนในครอบครัวในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ปริมณฑล และหัวเมืองใหญ่ ส่วนใหญ่ได้รับข้อมูลผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายบนเครือข่ายสังคมออนไลน์ เช่น เฟซบุ๊ก อินสตาแกรม ทวิตเตอร์ และยูทูบ แต่มักจะซื้อสินค้าดังกล่าวที่ร้านขายยาสมัยใหม่ (Drugstore) หรือ ร้านที่จำหน่ายสินค้ามากกว่าหนึ่งแบรนด์ (Multi-brand Store) เช่น บูท วัตสัน อีฟแอนด์บอย และเซโฟร่า ประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ใช้มากที่สุดคือ ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิว (Cleansing) รองลงมาคือบำรุงผิว (Nourishing) และฟื้นฟู (Rejuvenate) ปกป้องผิว (Protection) และปกปิด (Concealed) ตามลำดับ โดยมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการซื้อแต่ละครั้งอยู่ที่ 501 ถึง 1,000 บาท และมีความถี่ในการซื้อเฉลี่ย 1 ครั้งต่อเดือน โดยในการซื้อแต่ละครั้งมีการเปลี่ยนยี่ห้อบ้างในบางครั้ง

ผลการทดสอบสมมติฐานการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ พบว่า ปัจจัยวงสังคมส่วนบุคคล เฉพาะวงสังคมส่วนบุคคลใกล้ชิด (Inner circle) (β = 0.208) (Sig. = 0.002) ปัจจัยทัศนคติส่วนบุคคล (Personal attitude) ได้แก่ การพยายามทำให้ตัวเองให้ดูดีอยู่เสมอ (Motivation) (β = 0.262) (Sig. = 0.001) การให้ความสำคัญกับภาพลักษณ์ของตนในสายตาผู้อื่น (Self-image) (β = 0.224) (Sig. = 0.007) และปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด (4Ps) ได้แก่ ผลิตภัณฑ์น่าเชื่อถือว่ามีคุณประโยชน์ตามที่ระบุ (Effectiveness) (β = 0.191) (Sig. = 0.016) ราคาเหมาะสมกับคุณภาพ (Reasonable price) (β = 0.244) (Sig. = 0.006) ปัจจัยด้านราคาที่สามารถซื้อได้ (Affordable price) (β = -0.244) (Sig. = 0.007) และการส่งเสริมการตลาดมีการส่งเสริมภาพลักษณ์ของแบรนด์ (Brand image) (β = 0.160) (Sig. = 0.002) มีอิทธิพลต่อความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชาย (Intention to buy) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ซึ่งสมการพยากรณ์สามารถอธิบายอิทธิพลความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายของกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวายได้ร้อยละ 39.2 และมีค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ที่ ± 0.370 ดังแสดงในตารางที่ 1

Table 1 Result of multiple regression analysis.

Dependent Variable: Intention to buy, r = 0.626, R^2 = 0.392, Constant = -0.403, Std. Error of Model = 0.370

Independent Variables	Std. Error	Beta	Sig.	VIF
Inner circle	0.067	0.208**	0.002	1.176
Motivation	0.075	0.262**	0.001	1.579
Self-image	0.083	0.224**	0.007	1.557
Effectiveness	0.079	0.191*	0.016	1.545
Reasonable price	0.089	0.244**	0.006	2.007
Affordable price	0.068	-0.244**	0.000	1.609
Brand image	0.050	0.160**	0.002	1.142

*Significant level is .05 **Significant level is .01

จากตารางที่ 1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายมีค่า Variance inflation factor (VIF) ไม่เกิน 10 กล่าวคือตัวแปรอิสระไม่มีความสัมพันธ์กันเอง ส่วน ปัจจัยวงสังคมส่วนบุคคลทั่วไป (Outer circle) และ ปัจจัยด้านช่องทางการจัดจำหน่าย (Place) ไม่มีความสัมพันธ์กับความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 คณะผู้วิจัยจึงสามารถกำหนดสมการถดถอยเพื่อพยากรณ์ความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ Intention to buy = -0.403 + 0.208 (Inner circle) + 0.262 (Motivation) + 0.224 (Self-image) + 0.191 (Effectiveness) + 0.244 (Reasonable price) - 0.244 (Affordable price) + 0.160 (Brand image)

การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยพบว่าผู้บริโภคชายยุคใหม่เจเนอเรชันวายมีการให้ความสำคัญกับวงสังคมส่วนบุคคลใกล้ชิด เช่น คนในครอบครัว คนรัก และเพื่อนสนิท ซึ่งส่งผลต่อความสนใจที่จะซื้อ แต่ในขณะเดียวกันวงสังคมส่วนบุคคลทั่วไป เช่น เพื่อนร่วมงาน ดารา นักร้อง บล็อคเกอร์ เน็ตไอดอล และผู้ติดตามในสังคมออนไลน์ (Followers) กลับไม่มีอิทธิพลต่อความสนใจที่จะซื้อแต่อย่างใด แสดงให้เห็นว่าผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวายให้ความสำคัญกับปฏิสัมพันธ์ทางสังคมกับวงสังคมส่วนบุคคลใกล้ชิดของตนมากกว่าวงสังคมส่วนบุคคลทั่วไป ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงโอกาสในกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวาย ในแนวทางใหม่ที่แตกต่างจากแนวคิดการตลาดทั่วไป ณ ปัจจุบัน ซึ่งมุ่งเน้นการใช้บุคคลผู้มีอิทธิพลทางการตลาด (Influencer) ที่เป็นที่รู้จักดีของสังคมในการทำการตลาดแบบผสมผสาน (Integrated marketing communication)

ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะเฉพาะบางประการของผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวาย อันได้แก่ ปัจจัยการให้ความสำคัญกับภาพลักษณ์ของตน และปัจจัยการพยายามทำให้ตนเองดูดีอยู่เสมอ มีอิทธิพลต่อความสนใจที่จะซื้อ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khuong and Duyen (2016) ซึ่งพบว่า ภาพลักษณ์เป็นปัจจัยหลักในการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์บำรุงผิวสำหรับผู้ชาย เนื่องจากการพัฒนาภาพลักษณ์ของตนให้ดูดีขึ้นส่งผลต่อความสัมพันธ์กับคู่รักและคนในครอบครัว ทั้งนี้ผลการศึกษาในส่วนปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดพบว่า ปัจจัยด้านการส่งเสริมภาพลักษณ์ของแบรนด์มีอิทธิพลต่อความสนใจที่จะซื้อ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมและทัศนคติของผู้บริโภคชายยุคใหม่ที่เลือกใช้สินค้าหรือบริการที่มีแบรนด์สะท้อนถึงภาพลักษณ์ และลักษณะการดำเนินชีวิตของตน (มันตาภรณ์, 2559)

ในด้านของราคาพบว่าปัจจัยด้านราคาที่เหมาะสมกับคุณภาพมีอิทธิพลต่อความสนใจที่จะซื้อ กล่าวคือกลุ่มผู้บริโภคมีความเต็มใจจ่ายหากเห็นว่าผลิตภัณฑ์นั้นมีคุณค่าในระดับที่เหมาะสมกับราคาที่ต้องจ่าย ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่กลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวายเป็นกลุ่มผู้บริโภคที่มีกำลังซื้อและให้ความสำคัญกับภาพลักษณ์ของตนเอง จึงพิจารณาเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายที่มีคุณค่าเหมาะสมกับราคา ประเด็นน่าสนใจคือการที่ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงว่า ปัจจัยด้านราคาที่สามารถซื้อได้มีอิทธิพลต่อความสนใจที่จะซื้อ แต่ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของการพยากรณ์มีค่าเป็นลบเท่ากับ -0.244 กล่าวคือ ราคาที่สามารถซื้อได้ง่ายมีความสัมพันธ์ต่อความสนใจที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าสำหรับผู้ชายในลักษณะที่ผกผันกัน ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวายอาจมีมุมมองที่เห็นว่าสินค้าที่มีราคาสามารถหาซื้อได้มีคุณภาพด้อยกว่าสินค้าที่มีการตั้งราคาสูง ในส่วนของปัจจัยด้านช่องทางการจัดจำหน่ายที่ไม่มีผลต่อความสนใจที่จะซื้อนั้น อาจเนื่องจากกลุ่ม ผู้ชายยุคใหม่เจเนอเรชันวายอาศัยอยู่ในสังคมเมืองจึงสามารถหาซื้อผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าได้โดยง่าย ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งในระดับบุคคล สังคมส่วนบุคคล และทางการตลาด มีอิทธิพลต่อความสนใจที่จะซื้อ

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษานี้ สามารถเพิ่มองค์ความรู้ทางวิชาการและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในทางการตลาด โดยนักวิชาการ นักการตลาด และผู้มีความสนใจ อย่างไรก็ดีผู้นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ควรต้องพิจารณาความเหมาะสมในการปรับใช้กับกลุ่มเป้าหมายอื่น เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเฉพาะกลุ่มผู้ชายยุคใหม่เจเนอร์เรชั่นวาย พร้อมกันนี้คณะผู้วิจัยขอสนับสนุนให้มีการทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในประเด็นที่เกี่ยวข้อง โดยอาจมีการขยายกลุ่มตัวอย่างหรือทำการศึกษาวิจัยกับกลุ่มผู้ชายยุคใหม่ในเจเนอเรชันอื่น ซึ่งจะช่วยทำให้งานวิจัยในบริบทนี้มีคุณค่าเพิ่มเติม สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในเชิงวิชาการและในทางธุรกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

มันตาภรณ์ อนะวัชพงษ์. 2559. พฤติกรรมการเลือกซื้อและทัศนคติต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์เครื่องสำอางประเภทดูแลผิวของผู้บริโภคเพศชายยุคใหม่รุ่นเจเนอเรชันวาย. **วารสารการสื่อสารและการจัดการนิด้า** 2(3): 48-61.

วิภาวัส อิสราพานิช. 2557. อิทธิพลของกลุ่มอ้างอิงพฤติกรรมการบริโภคเสื้อผ้าแฟชั่นของวัยเด็กตอนปลาย. **วารสารการประชาสัมพันธ์และการโฆษณา** 10(2): 85-100.

ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. 2561. **ตลาดบิวตี้ยังแจ๋ว เกาะเทรนด์ธุรกิจทำเงิน** (Online). https://www.kasikornbank.com/th/business/sme/KSMEKnowledge/article/KSMEAnalysis/Documents/Beauty-Business_Trend.pdf, 25 พฤศจิกายน 2562

อรรคณัฐ วันทนะสมบัติ. 2562. **Social Comparison ความทุกข์จากการเปรียบเทียบกันบนโซเชียลมีเดีย** (Online). https://thematter.co/thinkers/social-media-comparison/70205, 25 พฤศจิกายน 2562

Forbes Thailand. 2562. **เมื่อ GenZ กำลังเปิดตลาด“เครื่องสำอางผู้ชาย”โอกาสทองของกิจการบิวตี้** (Online). https://forbesthailand.com/news/marketing/gen-z-เครื่องสำอางผู้ชาย, November 25, 2019

Khuong, M. N. and H.T.M. Duyen. 2016. Personal Factors Affecting Consumer Purchase Decision towards Men Skin Care Products-A Study in Ho Chi Minh City, Vietnam. **International Journal of Research in Finance and Marketing** 7(2): 44-50.

Sukato, N. and B. Elsey. 2009. A model of male consumer behavior in buying skin care products in Thailand. **ABAC Journal** 29(1): 39-52

Rytel, T. 2010. Emotional marketing concept: the new marketing shift in the postmodern era. **Business: Theory and Practice** 11(1): 30-3

Whitehead, S. 2008. Metrosexuality! Cameron, Brown and the politics of ‘new masculinity’. **Public Policy Research** 14(4): 234-239.

Yoh, E. *et al*. 2003. Consumer Adoption of the Internet: The Case of Apparel Shopping. **Psychology and Marketing** 20(12): 1095-1118.

การลดกากและตะกอนในน้ำสมุนไพรขิงด้วยเทคโนโลยีไฮโดรไซโคลนร่วมกับสารรวมตะกอนไคโตซาน

Reducing Sediment in Ginger Juice with Hydrocyclone Technology and Chitosan Flocculant

พิชัย สร้อยสน[1*] และ วิยงค์ กังวานศุภมงคล[1]

Pichai Soison[1*] and Wiyong Kangwansupamonkon[1]

บทคัดย่อ

ปัญหาหนึ่งที่มักพบในผลิตภัณฑ์น้ำสมุนไพรขิงบรรจุขวด คือการมีกากและตะกอนนอนก้นขวด ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ดูไม่น่าบริโภค ถึงแม้การเจือจางด้วยน้ำจะเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยเจือจางปริมาณตะกอนได้ แต่น้ำสมุนไพรที่ได้จะขาดกลิ่นรสขิงอันลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคต้องการ ดังนั้นทีมวิจัยจึงได้พัฒนากระบวนการแยกกากและตะกอนของน้ำสมุนไพรด้วยเทคโนโลยีไฮโดรไซโคลนร่วมกับสารรวมตะกอนไคโตซาน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนขิงออกจากน้ำขิง และสามารถคงกลิ่นรสของน้ำขิงไว้ได้ โดยในการวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการต้นแบบสำหรับแยกตะกอนในน้ำขิง โดยระบบประกอบด้วย 1) ชุดเติมไคโตซาน ซึ่งใช้เป็นสารรวมตะกอนก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน เพื่อให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การแยกด้วยไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น 2) ชุดไฮโดรไซโคลน และ 3) ชุดดักตะกอน ซึ่งผลการทดลองพบว่าไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนขิงได้ดีกว่าไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร โดยใช้ไคโตซานที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร สามารถลดกากและตะกอนในน้ำขิงได้มากถึง 96% โดยน้ำขิงมีปริมาณของแข็ง (Total solid, TS) ลดลงจาก 380±50 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 15±1 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าความขุ่น (Turbidity) ลดลงจาก 834.5±30 เหลือ 83.6±1.2 NTU นอกจากนี้น้ำขิงที่ได้ยังคงชูกลิ่นรสขิงเข้มข้น จากผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ไฮโดรไซโคลนร่วมกับการใช้สารช่วยรวมตะกอนเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถแยกตะกอนในน้ำสมุนไพรและคงรักษากลิ่นรสของวัตถุดิบเอาไว้ได้

ABSTRACT

One of the problems that is often found in bottled ginger herbal drinks is that there is residue and sediment existing in the bottle which makes the products look unappetizing. Even though water dilution is a method which helps dilute the sediment, the herbal juice will lack the ginger flavor which is the product characteristics expected by the consumers. Therefore, the research team had developed the process of separation and sedimentation of herbal water with hydrocyclone technology together with chitosan flocculant which is an effective technology for separating ginger sludge from ginger juice with an ability to preserve the flavor of the ginger juice. In this research, a prototype process was developed for the separation of ginger sludge separation, of which its system consisted of1) chitosan filling set as a sediment collector before entering into the Hydrocyclone in order to increase sediment size which helps the separation with higher efficiency 2) hydrocyclone set and 3) sediment trap set. The results showed that the hydrocyclone with a diameter of 10 mm. was more effective in separating ginger sediment than the diameter of 30 mm. The use of Chitosan at a concentration of 100 mg. per liter combined with the 10-millimeter hydrocyclone, the ginger sludge and sediment could reduce by up to 96%, with total solid (TS) reduced from 380 ± 50 to 15 ± 1.mg. per liter while the Turbidity reduced from 834.5 ± 30 to 83.6 ± 1.2 NTU.Furthermore, it was found that the ginger juice still remained a strong ginger flavor. The results of this research show that the implementation of hydrocyclone combined with the sediment collector is an effective method for separating sediment in herbal drinks and preserving the flavor of the raw materials.

Key words: Hydrocyclone, Rhizome, Sediment, Chitosan, Ginger drink

* Corresponding author; e-mail address: pichai@nanotec.or.th

[1]ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

[1]National Nanotechnology Center, National Science and Technology Development Agency, Pathumthani 12120

คำนำ

จากกระแสของผู้บริโภคทั่วโลกที่มีความต้องการดูแลสุขภาพมากขึ้น ทำให้เครื่องดื่มสมุนไพรได้รับความนิยมตามไปด้วย โดยเฉพาะในประเทศไทยเครื่องดื่มสมุนไพรจัดเป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่มสมุนไพรที่ได้รับความนิยมเป็นอันดับสาม รองจากเครื่องสำอางสมุนไพร และอาหารเสริมสมุนไพร [1] ซึ่งขิง (Ginger) จัดเป็นเป็นพืชที่นิยมนำมาทำน้ำสมุนไพรเนื่องจากสรรพคุณ แก้อาเจียน แก้ไอ ขับเสมหะ บรรเทาอาการคัดจมูก (วิทวัส, 2545) ลดอาการคลื่นไส้ของคนไข้หลังผ่าตัด (Chaiyakunapruk et.al , 2006) และยังเป็นน้ำสมุนไพรที่ดื่มได้ง่ายเป็นที่ชื่นชอบในทุกเพศทุกวัย

การผลิตน้ำสมุนไพรขิง เริ่มจากการนำส่วนของเหง้าขิงมาบดหรือทุบแล้วนำไปต้มสกัดด้วยความร้อน ซึ่งในกระบวนการผลิตจะเกิดกากและตะกอนของขิงปะปนอยู่ในน้ำ ซึ่งถ้าไม่มีการกำจัดตะกอนออกจะส่งผลให้เกิดการตกตะกอนนอนก้นขวดในผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคไม่ต้องการ (รัชฎา และ ชัชวาลัย, 2553; กัณหา, 2554; ดลนภา และ กัลทิมา, 2561) และการทำให้เจือจางด้วยน้ำจะลดปริมาณตะกอนได้แต่จะทำให้กลิ่นรสของสมุนไพรนั้นๆหายไป ซึ่งรสชาติของสมุนไพรยังเป็นปัจจัยสำคัญอันดับหนึ่งในการเลือกซื้อเครื่องดื่มสมุนไพรจากผู้บริโภค (กิตยาภรณ์, 2558)

ซึ่งในการแยกตะกอนออกจากของเหลว ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีจุดเด่นในเรื่องการแยกที่ทำได้รวดเร็วและต่อเนื่อง บำรุงรักษาง่าย ทนทานต่อการกัดกร่อน และมีอายุการใช้งานยาวนาน เช่น มีการนำไปใช้ในการแยกดินออกจากน้ำอ้อยในอุตสาหกรรมน้ำตาล (ภรัณญู และคณะ, 2556; พิชัย และคณะ, 2557) การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแป้งในอุตสาหกรรมแปรรูปมันสำปะหลัง (วรินทร และ อรรณพ, 2558) หรือการแยกกรวดและตะกอนออกจากน้ำ (Sriyono *et. al.*, 2019) อย่างไรก็ตาม-ข้อจำกัดของไฮโดรไซโคลนคือมีประสิทธิภาพต่ำในการแยกของแข็งหรือคอลลอยด์ในน้ำว่ามีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน (รัชฎา และ ชัชวาลัย, 2553) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (ประธาน และคณะ, 2559) ที่กล่าวไว้ว่าไม่สามารถใช้ไฮโดรไซโคลนเพียงอย่างเดียวในการคัดแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ ในน้ำขิง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้พัฒนาการใช้เทคโนโลยีไฮโดรไซโคลนร่วมกันการเติมสารรวมตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกตะกอนออกจากน้ำขิง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไคโตซานเนื่องจากสกัดที่ได้จากธรรมชาติ (วรรณี, 2553) มีลักษณะเป็นของเหลวเหนียวใส ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและมีความปลอดภัยในการนำมาประยุกต์ในอุตสาหกรรมอาหาร (ปิยบุตร, 2544)

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมน้ำสมุนไพรขิง

เริ่มจากการนำเหง้าขิงสดมาบดทั้งเปลือก และต้มด้วยน้ำในอัตราส่วน 1:10 เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองขั้นต้นด้วยผ้าขาวบาง ได้เป็นน้ำสมุนไพรขิงสำหรับนำไปใช้ในการทดลองต่อไป ยกเว้นน้ำขิงที่ใช้ในการทดสอบไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรจะใช้การกรองด้วยตะแกรงที่มีรูขนาด 1x1 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันกากและตะกอนขิงที่มีขนาดใหญ่เข้าไปอุดตันที่ทางเข้าของไฮโดรไซโคลน

การหาปริมาณสารช่วยรวมตะกอนที่เหมาะสม

เติมสารละลายไคโตซานจำนวน 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 และ 2.00 มิลลิลิตร ลงในน้ำสมุนไพรขิงจำนวน 200 มิลลิลิตรซึ่งบรรจุอยู่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ได้เป็น 9 ชุดการทดลองที่มีความเข้มข้นของไคโตซาน 0, 5, 12.5, 25, 37.5, 50, 62.5, 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จากนั้นกวนผสมให้เข้ากันแล้วเริ่มจับเวลา เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำน้ำขิงที่ได้ไปวัดความขุ่น (Turbidity) ด้วยเครื่องวัดความขุ่นแบบพกพายี่ห้อ Eutech instruments รุ่น TN100 โดยทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ รวมเป็น 3 การทดลอง

เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกากและตะกอนของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 และ 30 มิลลิเมตร ร่วมกับการใช้ไคโตซานเป็นสารรวมตะกอน

จากรูปที่ 1 (Figure 1) เริ่มจากนำน้ำสมุนไพรขิงที่เตรียมไว้เติมด้วยสารละลายไคโตซานจนได้ความเข้มข้นที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กวนผสมให้เข้ากัน เปิดสวิตช์ของปั๊ม (A) เพื่อป้อนน้ำสมุนไพรขิงเข้าไฮโดรไซโคลน (B) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบการแยกกากและตะกอน ปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์จนได้ความดันที่ทางเข้าไฮโดรไซโคลนที่ 3.5 บาร์ บันทึกอัตราการแยกที่ได้และเก็บตัวอย่างน้ำสมุนไพรขิงขาเข้า (1) และทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน (2) ไปวัดค่าความขุ่น และหาปริมาณของแข็ง (Total solid, TS) คำนวณหาประสิทธิภาพการแยกต่อไป จากนั้นทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนเป็นไฮโดรไซโคลนที่มีสัดส่วนเดียวกันแต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ซึ่งไฮโดรไซโคลนแต่ละขนาดจะมีการทำการทดลอง 2 ซ้ำ รวมเป็น 3 การทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพในการแยกกากและตะกอนในน้ำสมุนไพรขิงด้วยไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ร่วมกับการใช้ไคโตซานเป็นสารรวมตะกอน

จากรูปที่ 1 (Figure 1) เริ่มจากผู้วิจัยได้เตรียมน้ำขิงจำนวน 180 ลิตร แบ่งน้ำขิงมาทดลองครั้งละ 60 ลิตร ทำการทดลอง 3 ครั้งทั้งนี้เพื่อให้แต่ละการทดลองมีน้ำขิงขาเข้าที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกัน แต่ละการทดลองเริ่มจากนำน้ำสมุนไพรขิงที่เตรียมไว้เติมด้วยสารละลายไคโตซานจนได้ความเข้มข้นที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กวนผสมให้เข้ากัน เปิดสวิตช์ของปั๊ม (A) เพื่อป้อนน้ำสมุนไพรขิงเข้าไฮโดรไซโคลน (B) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบการแยกกากและตะกอน ปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์จนได้ความดันที่ทางเข้าไฮโดรไซโคลนที่ 3.5 บาร์ น้ำสมุนไพรขิงที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนจะไหลออกจากด้านบนของไฮโดรไซโคลน (2) ต่อไปยังชุดดักตะกอน (C) ขณะที่กากตะกอนและน้ำขิงบางส่วนที่แยกออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (3) จะถูกกรองผ่านตะแกรง (D) เพื่อดึงน้ำสมุนไพรขิงกลับเข้าสู่ระบบ

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำสมุนไพรขิงขาเข้า (1) และขาออก (3) ไปวัดค่าความขุ่นและหาปริมาณของแข็งตัวอย่างละ 3ครั้งและนำค่าเฉลี่ยที่ได้นำไปคำนวนประสิทธิภาพการแยกต่อไป ซึ่งในส่วนนี้ผู้วิจัยได้การชิมน้ำสมุนไพรขิงด้วยตัวเองและแบ่งคะแนนรสชาติของขิงเป็น 5 = เผ็ดร้อนมาก, 4 = เผ็ดร้อน, 3 = เผ็ดร้อนปานกลาง, 2 = เผ็ดร้อนน้อย, 1 =เผ็ดร้อนน้อยมาก, 0 = ไม่เผ็ดร้อน

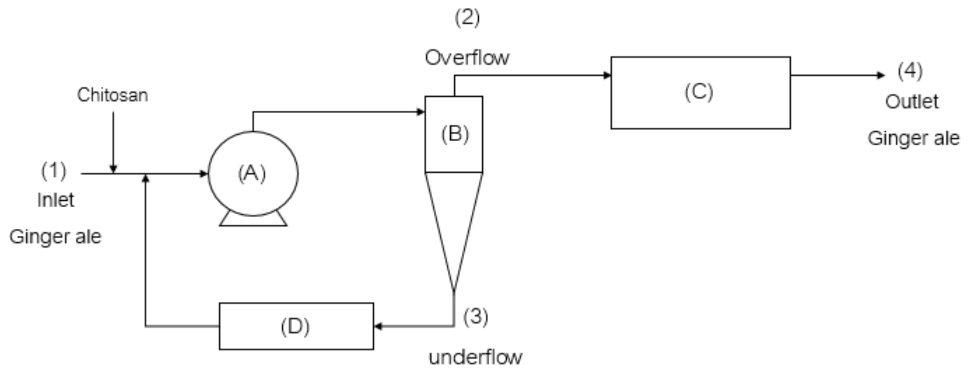


Figure 1 Diagram of ginger sludge separation process.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของปริมาณไคโตซานที่เหมาะสมในการลดความขุ่นในน้ำสมุนไพรขิง

ผลของความเข้มข้นของไคโตซานที่มีต่อค่าความขุ่นในน้ำสมุนไพรขิงแสดงในรูปที่ 2 (Figure 2) เมื่อตั้งชุดทดลองน้ำขิงให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที พบว่าชุดทดลองที่เติมไคโตซานที่ความเข้มข้น 75 และ100 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดความขุ่นของน้ำสมุนไพรขิงได้ร้อยละ 84 และ 94 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณไคโตซานที่มากขึ้นช่วยเพิ่มโอกาสในการเข้ารวมตัวกับตะกอนมากขึ้น รวมทั้งไคโตซานที่เติมลงไปนั้นเป็นพอลิเมอร์สายยาวที่มีประจุบวกเนื่องจากมีหมู่อะมิโนอยู่ในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก จึงมีความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของตะกอนขนาดเล็กที่มีประจุลบ ซึ่งแขวนลอยอย่างคงตัวในของเหลวให้รวมตัวใหญ่ขึ้นและแยกออกได้ง่ายขึ้น (ปิยบุตร, 2544) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกสารช่วยในการรวมตะกอน(ไคโตซาน) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงกว่า เข้าร่วมในกระบวนการแยกตะกอนที่มีไฮโดรไซโคลนนี้ เพื่อช่วยทำให้การแยกตะกอนละเอียดในน้ำขิงทำได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น

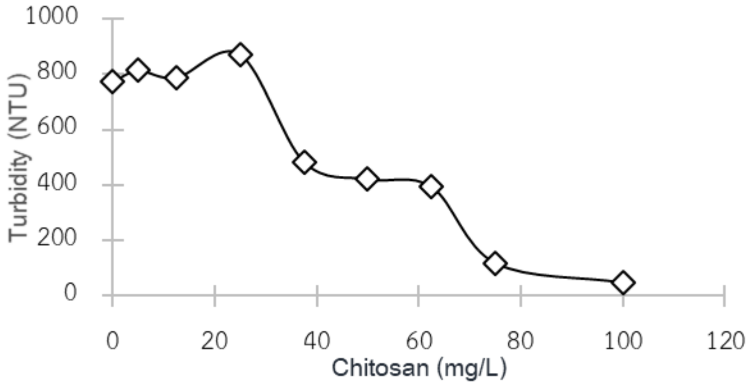


Figure 2 Effect of chitosan concentration on turbidity of ginger ale after 30 minutes (n=3).

ผลของเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนที่มีต่อค่าความขุ่นในน้ำขิงที่เติมด้วยไคโตซานที่ความเข้มข้น 100 mg/L แสดงในรูปที่ 3 (Figure 3) พบว่าที่เวลา 0, 0.5, 1 และ 30 ชั่วโมง วัดค่าความขุ่นในน้ำขิงได้ 915±8, 49±2, 29±0 และ 4±0 NTU ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความขุ่นลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 0.5 ชั่วโมง หลังจากนั้นความ

ขุ่นจะลดลงอย่างช้าๆ ผู้วิจัยจึงได้เลือกระยะเวลาที่ 0.5 ชั่วโมงซึ่งเป็นเวลาที่สั้นที่ทำให้เกิดการตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพ และการวางไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลานานอาจมีเชื้อแบคทีเรียหรือราที่ทำให้น้ำสมุนไพรเน่าเสียได้ง่าย (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2559) ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนจะถูกนำไปออกแบบขนาดชุดดักตะกอนที่เหมาะสมต่อไป

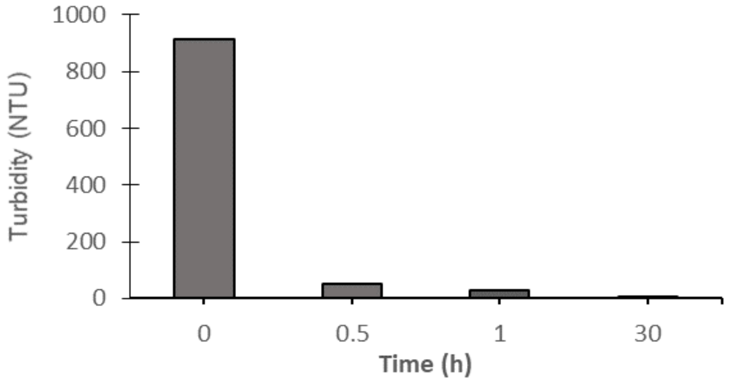


Figure 3 Effect of sediment time on turbidity of ginger ale with chitosan 100 mg/L (n=3).

เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกากและตะกอนของไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 และ 30 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 1 (Table 1) พบว่า ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ให้ประสิทธิภาพการแยกที่สูงกว่าไฮโดรไซโคลนขนาด 30 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเล็กจะมีความเร็วที่ทางเข้าสูง จึงมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมากกว่าไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Sriyono *et al.*, 2019; Abdollazadeh *et al.*, 2011) แม้ว่าน้ำขิงขาเข้า (1) ของไฮโดรไซโคลนทั้งสองขนาดจะมีปริมาณของแข็งไม่เท่ากัน เนื่องจากในขั้นตอนของการเตรียมน้ำขิงที่ใช้วัสดุกรองน้ำสมุนไพรที่มีขนาดรูกรองต่างกันตามขนาดทางเข้าไฮโดรไซโคลน ซึ่งไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรยังให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แม้ว่าในสมุนไพรขิงจะมีกากและตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่า แสดงถึงประสิทธิภาพในการแยกกากและตะกอนขนาดเล็กได้ดีกว่าไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

Table 1 Effect of hydrocyclone diameter on capacity and separation efficiency (n=3).

Hydrocyclone diameter (mm)	Total solid (mg/L) (1) Inlet ginger ale	(2) Overflow	Efficiency (%)
10	380	130	65 %
30	872	380	56 %

ผลทดสอบประสิทธิภาพในการแยกกากและตะกอนในน้ำสมุนไพรขิงด้วยไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ร่วมกับการใช้ไคโตซานเป็นสารรวมตะกอน

ตารางที่ 2 (Table 2) แสดงในเห็นว่า การเติมสารไคโตซานที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ร่วมกับการใช้ไฮโดรไซโคลนและชุดดักตะกอน สามารถลดปริมาณของแข็งในน้ำขิงจาก 380±50 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเพียง 15±1 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละ 96 และมีค่าความขุ่นลดลงจาก 834.5±30.8 NTU เหลือ 83.6±1.2 NTU หรือคิดเป็นร้อยละ 90 ผลการทดสอบรสชาติน้ำขิงหลังการแยก พบว่าน้ำขิงยังคงมีรสชาติที่เผ็ดร้อนใกล้เคียงกับน้ำขิงที่ได้จากการต้มและผ่านการกรองด้วยผ้าขาวบาง โดยมีคะแนนความเผ็ดร้อนเท่ากับ 5

Table 2 Separation efficiency with hydrocyclone technology (n=3).

Ginger ale sample	Inlet (1)	Outlet (3)	Separation efficiency
Total Solid (mg/L)	380±50	15±1	96%
Turbidity (NTU)	834.5±30.8	83.6±1.2	90%

สรุป

จะเห็นได้ว่าชุดกระบวนการแยกซึ่งประกอบไปด้วย ชุดเติมไคโตซาน ไฮโดรไซโคลน และชุดดักตะกอน สามารถประยุกต์ใช้ในการลดกากและตะกอนในน้ำสมุนไพรขิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไฮโดรโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรสามารถแยกกากและตะกอนขิงได้ถึงร้อยละ 66 และเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 96 เมื่อใช้ร่วมกับชุดเติมไคโตซานซึ่งช่วยรวมตะกอนขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่และแยกออกมาได้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาปริมาณตะกอนที่จะตกตะกอนในผลิตภัณฑ์ได้

แม้ว่าชุดกระบวนการแยกนี้มีกำลังการผลิตที่ 60 ลิตรต่อชั่วโมง แต่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตขึ้นอีกเท่าตัวด้วยการนำไฮโดรไซโคลนมาต่อขนานกันซึ่งเป็นวิธีที่พบได้มากในเพิ่มกำลังการผลิตของไฮโดรไซโคลนในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนั้นควรเพิ่มขนาดของชุดดักตะกอนให้ใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นด้วย การใช้ไฮโดรไซโคลนในขั้นต้นของกระบวนการแยกนั้น จะช่วยลดปริมาณกากและตะกอนมากกว่าครึ่งหนึ่งของปริมาณกากและตะกอนที่มีทั้งหมดในน้ำขิง อีกทั้งสามารถทำการแยกได้ต่อเนื่อง ไม่ต้องการการเปลี่ยนวัสดุกรองและการบำรุงรักษา จึงเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำสมุนไพรในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย และสถานที่ในการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณ ดร.จามร เชวงกิจวนิช ที่ได้สละเวลาให้คำเสนอแนะ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของบทความนี้จนเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

กัณหา อุ้ยฟัก. 2554. **การลดการตกตะกอนในน้ำขิงพร้อมดื่มบรรจุขวด**. วิทยานิพนธ์ ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2559. **การยืดอายุน้ำสมุนไพรด้วยการพาสเจอร์ไรซ์อย่างง่าย** (Online). https://bsc.dip.go.th/th/category/production2/qs-pasteurization

กิตยาภรณ์ ลำลึก. 2558. **ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการซื้อเครื่องดื่มชาผสมสมุนไพรพร้อมดื่มของผู้บริโภคในจังหวัดปทุมธานี**. คณะบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ดลนภา พัฒนาศักดิ์ และ กัลทิมา พิชัย .2561. **ผลของสารเบนโทไนท์ต่อความใสของไวน์กระเจี๊ยบแดง**. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.

ดุษฎี อุตภาพ, ม.ป.ป. **สมบัติทางเคมีของคาร์โบไฮเดรท-ไฮโดรคอลลอยด์ และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม**. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ (Online). https://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/contact.html

ปิยบุตร วานิชพงษ์พันธ์. 2544. **ไคติน-ไคโตซาน**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ปทุมธานี (Online). http://www.nnr.nstda.or.th/blogs/nnr/wpcontent/uploads/2012/07/kaitin-kaitosan-village.pdf

ประธาน วงศ์ศิริเวช, พิชัย สร้อยสน, ศิวกร รื่นพันธุ์, ปิยวรรณ เพชราภา และชยุดา ฆารพล. (2559). **รายงานการวิจัยการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกน้ำขิงใสจากกระบวนการผลิตขิงดองด้วยเทคโนโลยีไฮโดรไซโคลน**. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปทุมธานี.

พิชัย สร้อยสน, ประธาน วงศ์ศิริเวช และ ธนิต สวัสดิ์เสวี. 2557. ผลของอัตราส่วนการไหล และอัตราส่วนความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนขนาด 100 มิลลิเมตร. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.** 37(4). 417-427.

ภรัณญู รื่นกลิ่น, นุชนาถ ลาดคูบอน, ภูเบศ มีนะโรจน์, คณาวุฒิ ศรีระหงส์, ธนิต สวัสดิ์เสวี, ฉัตรชัย นิมมล และ ประธาน วงศ์ศิริเวช. 2556. อิทธิพลของความเข้มข้นดินและขนาดทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนในการแยกดินและน้ำอ้อย. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม** 32 (5). 699-703.

รัชฎา ตั้งวงศ์ชัย และ ชัชวาลัย อรรถพลไพศาล. 2553. **ผลของการใช้ความดันสูงและอุณหภูมิที่มีต่อเอนไซม์ PME ในน้ำผลไม้แบบขุ่น**. คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

วิทวัส (ภาสกิจ) วัณนาวิบูล. 2545. **ขิง ยาอายุวัฒนะที่ไม่ควรมองข้าม**. บทความสุขภาพน่ารู้ นิตยสารหมอชาวบ้าน (Online). https://www.doctor.or.th/article/detail/2590

วรินทร สงคศิริ, อรรณพ นพรัตน์, สงกรานต์ ทิพย์วงศ์ และถาวร รัตติทิวาพาณิชย์. 2550. **การพัฒนาไฮโดรไซโคลนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกแป้ง สำหรับหน่วยแยกแป้งมันสำปะหลัง**. หน่วยปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาวิศวกรรมชีวเคมีและโรงงานต้นแบบ. ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ, ปทุมธานี.

วรรณี ศรีนุตตระกูล. 2553. **จากเปลือกกุ้งและกระดองปูสู่ไคโตซาน.** กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). นครนายก (Online). http://www.tint.or.th/nkc/nkc53/content/nstkc53-062.html

สำนักข่าวฐานเศรษฐกิจ. 2016. **เผยตลาดสมุนไพรโลกขยายตัวตามกระแสสุขภาพ-ความงาม ชี้ปี 63 ภาพรวมพุ่งกว่าแสนล้านเหรียญฯ** (Online). http://www.thansettakij.com/content/84270

Abdollahzadeh, L., M. Habibian, R. Etezazian and S. Naseric. 2011. Study of particle's shape factor, inlet velocity and feed concentration on mini-hydrocyclone classification and fishhook effect. Powder Technology 283: 294-301.

Sriyono, S., R. Kasmastute, S. L. Butarbutar and D. H. Salimy. 2019. Analysis of hydrocyclone as river water pre-treatment for tertiary coolant of RDE. Journal of Physics Conference Series 1198(2): 1-9.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

Subject: Agro-Industry

ภาคโปสเตอร์
Poster Presentation

KU
KASETSART
UNIVERSITY

Immunomodulatory Activities of Extracted Okra Mucilage (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) in THP-1 Macrophage Cell Model

Soranan Tieobut[1,2], Ladda Sangduean Wattannasiritham[3] and Wasaporn Chanput[1,2*]

ABSTRACT

The aim of this study was to examine immune modulating activities of okra mucilage digested fluid (OMD) on THP-1 macrophages. Moisture and chemical compositions (protein, pectin and total phenolic compounds) of okra mucilage (OM) isolated from steamed okra pods (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench), was determined. Pectin, as the main component of okra mucilage, was found at a concentration of 172.73 g/kg (dry basis) in OM. After passing the OM through a simulated *in vitro* digestive system, the molecular weight of polysaccharide remained similar to that of before digestion, indicating the character of indigestible polysaccharide. After stimulating THP-1 macrophages with OMD, pro-inflammatory cytokine genes; IL-1β, IL-8 and TNF-α, were up-regulated. Phagocytosis of fluorescently-labelled polysaccharide in OMD was observed after 0.5 h of incubation. Our finding suggested that okra mucilage had an ability to stimulate the immune system through macrophage activation.

Key words: Okra mucilage; Polysaccharide; *In vitro* digestion; Immunomodulatory activity; THP-1 Macrophage

*Corresponding author; e-mail address: wasaporn.c@ku.ac.th

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

[2]Center for Advanced Studies for Agriculture and Food, KU Institute for Advanced Studies, Kasetsart University, Bangkok, 10900

[3]Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Okra pods, *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench, have been used in Asia as a common table vegetable. Okra mucilage (OM) is suggested to compose of indigestible polysaccharides, which showed the ability to inhibit proliferation of human hepatocellular carcinoma (HepG-2 cells) (Zheng *et al.*, 2014). Its main structure is tightly bound to protein molecule to form a complex peptidoglycan network (Cosgrove, 2001). The main sugar composition of OM is galactose, rhamnose and galacturonic acid Lengsfelf *et.al.* (2004). Zheng *et al.* (2014) reported that polysaccharide extracted from okra flower (*Abelmoschus esculentus* L.) had molecular mass of 1700 kDa. However, the size is highly depended on extraction methods, extracting solvent, purification techniques and okra plant variety. Trakoolpolpruek *et al.* (2019) showed that polysaccharide derivatives were nontoxic to THP-1 macrophages. Extracted okra polysaccharide exhibited immune stimulating activity by increasing proinflammatory gene expression; IL-8, IL-1β and TNF-α expression. While Immune stimulating activity of fractionated okra polysacharide could not be observed, indicating the high molecular weight (MW) and homogalacturonan associated with Rhamnogalacturonan I (RG-I) are important okra pectic polysaccharide structural features for macrophages stimulation. Polysaccharides isolated from *Ecklonia cava* and *Aloe vera* could reduce pro-inflammatory cytokine production, IL-8, TNF-α, IL-6 and IL-1β, in LPS-stimulated THP-1 macrophages and human monocyte-derived macrophages (Budai *et al.*, 2013; Kang *et al.*, 2011). The objective of this study was to determine immunomodulatory activities of okra mucilage on THP-1 macrophage cell line model.

MATERIALS AND METHODS

1. Extraction of okra mucilage (OM)

Fresh okra pods were purchased from a local supermarket in Bangkok, Thailand. They were cleaned and the calyx was removed. The cleaned okra pods were steamed for 7 min, cooled down and minced using a blender. The pulp was pressed through a filter press to obtain OM and kept at -20 °C until use. *In vitro* digestion of OM was followed the method described by Minekus *et al.* (2014).

2. *In vitro* digestion of okra mucilage (OM)

Firstly, 5 g of OM was mixed with 3.5 ml of simulated salivary fluid at pH 7 with the use of α-amylase enzyme (1500 U/ml), then incubated for 2 min. Ten ml of oral phase fluid was mixed with salivary gastric fluid at pH 3 with addition of pepsin enzyme (2,000 U/ml) and incubated at 37 °C for 2 h. Twenty ml of gastric phase fluid was mixed with simulated intestinal fluid at pH 7, bile extract (160 mg/ml) and pancreatic enzyme (26.8 mg/ml), and incubated at 37 °C for 2 h. The okra mucilage digested fluid (OMD) was centrifuged at 5,000 rpm for 15 min at 4°C to separate the precipitate. The supernatant was stopped in liquid nitrogen and kept at –20 °C. The sample was analysed chemical

composition including moisture and protein, total phenolic content (Zou *et al*., 2011) and pectin (Blumenkrantz and Asboe-Hansen, 1973).

3. Molecular weight of okra mucilage before (OM) and after (OMD) *in vitro* digestion

The OM and OMD were passed through a 5 µm filter. The molecular weight (MW) of OM and OMD was determined using high performance size exclusion chromatography (HPSEC). Guard column was Shodex OHpak SB-G (Shodex®, Japan) and analytical column was Shodex OHpak SB-806 HQ and Shodex OHpak SB-804 HQ (Shodex®, Japan). The injection volume was 15 µl and 0.1 mol/L sodium nitrate was used as a mobile phase with the flow rate of 0.4 ml/ min. A refractive index (RI) detector with column temperature of 40 °C was used. Dextran was applied as standards to generate a calibration curve.

4. THP-1 cell culture and differentiation into macrophages

THP-1 monocytes (5×10^5 cells in each well of a 24 well-plate) were cultured in RPMI 1640 supplemented with 10% fetal Bovine Serum and 1% penicillin/streptomycin. Differentiation of THP-1 monocytes into macrophages was induced by 100 ng/ml Phorbol 12-myristate 13-acetate (PMA) for 48 h at 37 °C with 5% CO_2 in a humidified incubator. Differentiated macrophages were washed twice with culture medium (without PMA) and rested for another 24 h (Chanput *et al*., 2010).

5. Immunomodulatory activity of digested okra mucilage

MTT assay was used to access cytotoxicity as described by Chanput *et al.* (2012). THP-1 macrophages (5×10^4 cells in each well of a 96-well plate) were stimulated with pectin at different concentrations of 0.25, 0.5, 25, 50 and 100 µg/ml of OMD and incubated for 3, 6 and 24 h at 37 °C at 5% CO_2 in a humidified incubator. For expression of inflammatory genes, THP-1 macrophages were stimulated with OMD at pectin concentrations of 25, 50 and 100 µg/ml for 6 h at 37 °C with 5% CO_2 in a humidified incubator. After 6 h of incubation, cells were harvested and RNA was isolated by GeneJET RNA purification kit (Thermo Scientific™, New York, U.S.A.). RNA concentration was measured using NanoDrop (NanoDrop™ 2000c Spectrophotometer Thermo Scientific™, New York, U.S.A) and RNA purity was visualized with agarose gel electrophoresis under UV detection. Complementary DNA (cDNA) was synthesized with RevertAid First strand cDNA synthesis kit (Thermo Scientific™, New York, U.S.A.). The cDNA was mixed with IQTM SYBR Green Supermix (Bio-Rad, California, U.S.A). Expression of inflammatory cytokine genes, IL-1β, IL-8 and TNF-α were determined using real-time qPCR (CFX96 TouchTM, Bio-Rad, California, U.S.A). Relative gene expression was calculated with ΔΔCt (Chanput *et al*., 2010). Non-stimulated cells and GADPH gene expression were used for normalization. The experiments were performed with two independent replications.

6. The engulfment of OMD by THP-1 macrophages

One to one ratio of 1 M 2-aminoacridone (2-AMAC) and OMD was thoroughly mixed for 1 min. Then, 20 µl of 1 M sodium cyanoborohydride was added into a mixture and incubated at 60 ^{o}C in a water bath for 8 h without light. The reaction was inhibited by immersing the reaction in liquid nitrogen. The dried sample was dissolved with 400 µl 50% DMSO. The labelled OMD was added into THP-1 macrophage in 24-wells plate format ($5×10^5$ cells/well) and incubated for 0.5 h and 6 h. The solution was gently removed, rinsed with 1 M Tris buffer, and fixed with 200 µl of 4% methanol. The observation was performed by the mean of confocal laser-scanning microscopy (FV10-ASW 4.2, Olympus Co., Ltd. Japan) (Zhao *et al*., 2011).

7. Statistical analysis

The experiment was complete block designed (CBD). Comparison among treatments was calculated using SPSS. One-way ANOVA with Multiple Comparisons and Duncan post-hoc test was applied. A value of $p<0.05$ was considered to be significant.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Chemical composition and molecular weight (MW) of okra mucilage before and after *in vitro* digestion

Okra mucilage yield was 48.54%± 0.08 (w/w dry basis). As polysaccharides, proteins and polyphenols have been reported to potentially exhibit immune modulating activity (Schepetkin and Quinn, 2006), therefore, they were determined the presence in okra mucilage (OM). Chemical composition in OM and OMD solution (0.14 g/ml) were determined as shown in Table 1. Pectin and phenolic compounds in OMD showed significantly higher than that of OM. It might be due to the destruction of plant cell wall by depolymerization, resulting in the release of pectin and phenolic compounds from plant cell wall (BeMiller *et al*., 1993). The lower protein content in OMD could be due to protein digestion during *in vitro* digestion. After passing through the 5 µm filter, concentration of pectin of OMD was 699.34 ± 0.15 µg/ml, due to the fact that high polymeric complexes could not pass through the 5 µm filter (Carpita and Gibeaut, 1993; O'neill *et al*., 2001). The molecular weight of polysaccharide in OM and OMD was found to be similar with the approximate size of 10^7 Dalton. This finding is in concordance with that of Newton *et al.* (2015) and Sengkhamparn *et a*l. (2009) reported the size of polysaccharide extracted with hot water to be greater than 10^6 Dalton and 10^5 Dalton with hot buffer and chelating agent extraction. Moreover, they also reported that okra polysaccharides were mainly comprised of pectin as the main polysaccharide in okra cell wall.

Table 1 Chemical composition of okra mucilage before (OM) and after (OMD) *in vitro* digestion.

	Pectin (µg/ml)	Phenolic compounds (µg/ml)	Protein (µg/ml)
OM	800.56 ± 0.11^{b}	263.23 ± 1.55^{b}	330.03 ± 0.02^{a}
OMD	886.23 ± 0.41^{a}	339.02 ± 0.34^{a}	300.02 ± 0.00^{b}

Note: Values are means from three independent replication and different letters in the same column are regarded as significantly different (p< 0.05).

2. Cell viability of THP-1 macrophages stimulated with OMD

Cell viability of THP-1 macrophage stimulated with pectin concentration of 0.25, 0.5, 25, 50 and 100 µg/ml at 3, 6 and 24 h showed greater than 90% (data not show), implying that OMD up to 100 µg/ml was not toxic to THP-1 macrophages. It has been reported in many studies that polysaccharides originated from plants are relatively non-toxic and do not cause significant side effects *in vitro* studies (Carnachan *et al*., 2012; Sheu and Lai, 2012). Therefore, pectin concentrations at 25, 50 and 100 µg/ml of OMD with incubation time at 6 h were selected to proceed immune modulating activity determination.

3. Expression of inflammatory genes of THP-1 macrophages stimulated with OMD

After 6 h incubation of THP-1 macrophages with OMD at okra pectin concentrations of 25, 50 and 100 µg/ml, expression of inflammatory genes; IL-1β, IL-8 and TNF-α genes were analysed. The expression of IL-1β gene was highest up-regulated at 50 µg/ml ($p < 0.05$), while IL-8 gene was at 100 µg/ml. TNF-α gene was significantly induced in a dose-dependent manner (Figure 1).

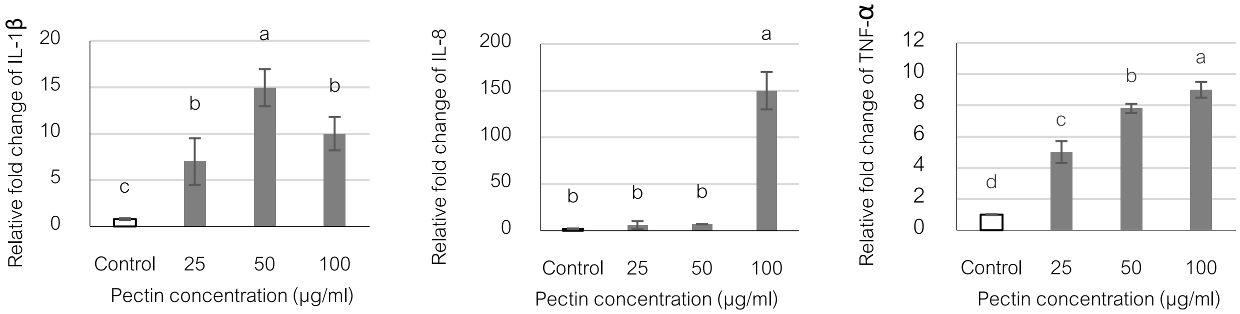


Figure 1 Expression of pro-inflammatory genes of THP-1 macrophages stimulated with OMD at different okra pectin concentrations. Values are means from two independent replications. Different letters in each figure imply significantly different of treatments ($p<0.05$).

Different responses of the analysed genes can be explained by the fact that the transcription rate and gene expression kinetics of each inflammatory gene could be different (Chanput *et al*., 2010; Skrzypski, 2008). The immune stimulating activity of okra mucilage is in concordance with the study of Sheu and Lai, (2012) indicating the induction of pro-inflammatory cytokine gene expression; IL-12 and IFN-y at 100 µg/ml on macrophages derived-murine dendritic cells. Trakoolpolpruek *et al.* (2019)

reported okra polysaccharide with 20 μg/ml significantly induced IL-8, IL-1β and TNF-α. The presence of proteins in OMD may also contribute to stimulate immune responses in THP-1 macrophages as it has been shown that proteins and peptides could induce proliferation, maturation and cytokine production of immune cells (Gill *et al.*, 2000). Therefore, it might be concluded that okra polysaccharide in OMD, at least in part, can stimulate immune responses in THP-1 macrophage by enhancing pro-inflammatory cytokine gene expression.

4. The engulfment of OMD by THP-1 macrophages

It was surprising to us that THP-1 macrophages started to engulf a remarkable amount of polysaccharide within 0.5 h (Figure 2). The fluorescence intensity of THP-1 macrophages at 6 h of incubation was higher than that of at 0.5 h. Potential mechanism of macrophage activation by polysaccharides has been reported to involve endocytosis-dependent pathways. Polysaccharide binds to pattern recognition receptors (PRRs), which could be then engulfed so called endocytose and later digested by lysosomal enzymes (Schepetkin and Quinn, 2006).

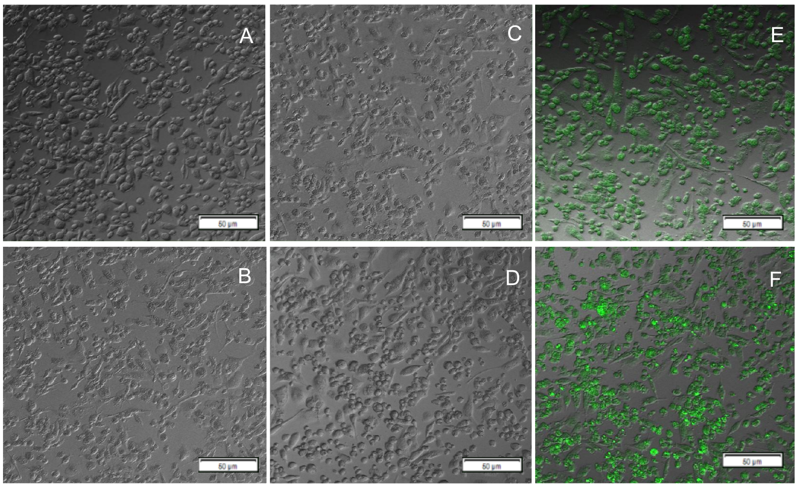


Figure 2 The engulfment of OMD by THP-1 macrophage. Non-treated THP-1 macrophages (A), THP-1 macrophages treated with 2-AMAC 6 h (B), THP-1 macrophages treated with OMDS without 2-AMAC 0.5h (C) and 6 h (D), OMDS treated with OMD-2-AMAC 0.5h (E) and 6 h (F).

CONCLUSIONS

From our *in vitro* study, okra mucilage showed no toxicity to THP-1 macrophages up to 100 μg/ml. Okra mucilage has the ability to stimulate functions of macrophages through induction of pro-inflammatory cytokines gene expression and enhancement of phagocytosis. Further investigation in animal studies should be conducted to draw a definite conclusion.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially supported by the Center for Advanced Studies for Agriculture and Food, Institute for Advanced Studies, Kasetsart University under the Higher Education Research Promotion

and National Research University Project of Thailand, Office of the Higher Education Commission, Ministry of Education, Thailand.

REFERENCES

BeMiller, J.N., R. Whistler, D.G. Barkalow and C.-C. Chen. 1993. Aloe, chia, flaxseed, okra, psyllium seed, quince seed, and tamarind gums. **Industrial Gums, Whistler RL, BeMiller JN (eds.), Academic Press, New York.** 227-256.

Blumenkrantz, N. and G. Asboe-Hansen. 1973. New method for quantitative determination of uronic acids. **Analytical Biochemistry.** 54:484-489.

Budai, M.M., A. Varga, S. Milesz, J. Tőzsér and S. Benkő. 2013. Aloe vera downregulates LPS-induced inflammatory cytokine production and expression of NLRP3 inflammasome in human macrophages. **Molecular Immunology.** 56:471-479.

Carnachan, S.M., T.J. Bootten, S. Mishra, J.A. Monro and I.M. Sims. 2012. Effects of simulated digestion in vitro on cell wall polysaccharides from kiwifruit (Actinidia spp.). **Food Chemistry.** 133:132-139.

Carpita, N.C. and D.M. Gibeaut. 1993. Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. **The Plant Journal.** 3:1-30.

Chanput, W., J. Mes, R.A. Vreeburg, H.F. Savelkoul and H.J. Wichers. 2010. Transcription profiles of LPS-stimulated THP-1 monocytes and macrophages: a tool to study inflammation modulating effects of food-derived compounds. **Food & Function.** 1:254-261.

Chanput, W., M. Reitsma, L. Kleinjans, J.J. Mes, H.F. Savelkoul and H.J. Wichers. 2012. β-Glucans are involved in immune-modulation of THP-1 macrophages. **Molecular Nutrition & Food Research.** 56:822-833.

Cosgrove, D.J. 2001. Wall structure and wall loosening. A look backwards and forwards. **Plant Physiology.** 125:131-134.

Gill, H.S., F. Doull, K. Rutherfurd and M. Cross. 2000. Immunoregulatory peptides in bovine milk. **British Journal of Nutrition.** 84:111-117.

Kang, S.-M., K.-N. Kim, S.-H. Lee, G. Ahn, S.-H. Cha, A.-D. Kim, X.-D. Yang, M.-C. Kang and Y.-J. Jeon. 2011. Anti-inflammatory activity of polysaccharide purified from AMG-assistant extract of Ecklonia cava in LPS-stimulated RAW 264.7 macrophages. **Carbohydrate Polymers.** 85:80-85.

Lengsfeld, C., F. Titgemeyer, G. Faller and A. Hensel. 2004. Glycosylated Compounds from Pkra Inhibit Adhesion of Helicobacter Pylori to Human Gastric Mucosa. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 52(6):1495-1503.

Minekus, M., M. Alminger, P. Alvito, S. Ballance, T. Bohn, C. Bourlieu, F. Carriere, R. Boutrou, M. Corredig and D. Dupont. 2014. A standardised static in vitro digestion method suitable for food–an international consensus. **Food & Function.** 5:1113-1124.

Munson, T.E. 1985. Guideline for validation of the LAL test as an end-product endotoxin test for human and biological drug products. **Progress in Clinical and Biological Research.** 189211.

Newton, A., V. Indana and J. Kumar. 2015. Chronotherapeutic drug delivery of Tamarind gum, Chitosan and Okra gum controlled release colon targeted directly compressed Propranolol HCl matrix tablets and in-vitro evaluation. **International Journal of Biological Macromolecules.** 79290-299.

O'neill, M.A., S. Eberhard, P. Albersheim and A.G. Darvill. 2001. Requirement of borate cross-linking of cell wall rhamnogalacturonan II for Arabidopsis growth. **Science.** 294:846-849.

Schepetkin, I.A. and M.T. Quinn. 2006. Botanical polysaccharides: macrophage immunomodulation and therapeutic potential. **International Immunopharmacology.** 6:317-333.

Sengkhamparn, N., R. Verhoef, H.A. Schols, T. Sajjaanantakul and A.G.J. Voragen. 2009. Characterisation of cell wall polysaccharides from okra (Abelmoschus esculentus (L.) Moench). **Carbohydrate Research.** 344:1824-1832.

Sheu, S.-C. and M.-H. Lai. 2012. Composition analysis and immuno-modulatory effect of okra (Abelmoschus esculentus L.) extract. **Food Chemistry.** 134:1906-1911.

Skrzypski, M. 2008. Quantitative reverse transcriptase real-time polymerase chain reaction (qRT-PCR) in translational oncology: lung cancer perspective. **Lung Cancer.** 59:147-154.

Trakoolpolpruek, T., S. Moonmangmee and W. Chanput. 2019. Structure-dependent immune modulating activity of okra polysaccharide on THP-1 macrophages. **Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre.** 17: 2212-6198

Zhao, L.-H., Z.-X.Ma, J. Zhu, X.-H.Yu and D.-P.Weng. 2011. Characterization of polysaccharide from Astragalus radix as the macrophage stimulator. **Cellular Immunology.** 271: 329-334.

Zheng, W., T. Zhao, W. Feng, W. Wang, Y. Zou, D. Zheng, M. Takase and X. Wu. 2014 Purification, characterizatiion and immunomodulating activity of a polysaccharide from flower of *Abelmoschus Esculentus.* **Carbohydrate Polymers**. 106(1):335-42.

Zou, Y., S.K. Chang, Y. Gu and S.Y. Qian. 2011. Antioxidant activity and phenolic compositions of lentil (Lens culinaris var. Morton) extract and its fractions. **Journal of Agricultural and Food Chemistry.** 59:2268-2276.

ผลของคาราจีแนน กลูโคแมนแนน และโลคัสบีนกัม ต่อเนื้อสัมผัสและลักษณะทางประสาทสัมผัสในผลิตภัณฑ์เยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่ม

Effect of Carrageenan Konjac Glucomannan and Locust Bean Gum on Texture and Sensory Characteristics of Roselle Jelly Drink

วรลักษณ์ แสงธาราทิพย์[1] อนุวัตร แจ้งชัด[1*] และ กมลวรรณ แจ้งชัด[1]

Woraluk Saengtaratip[1], Anuvat Jangchud[1*] and Kamolwan Jangchud[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเนื้อสัมผัสของเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่มที่มีส่วนผสมจากเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลัก (เมือกผสม) โดยใช้คาราจีแนน กลูโคแมนแนนจากผงบุก และโลคัสบีนกัม พบว่า เมือกผสมมีผลต่อความแข็ง โดยมีค่าความแข็งสูงกว่าสิ่งทดลองที่ไม่เติมเมือกผสมที่ระดับคาราจีแนนเดียวกัน ($p\leq0.05$) สิ่งทดลองที่ใช้เมือกผสมร่วมกับคาราจีแนน ร้อยละ 0.25 ของน้ำหนักสูตร ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมและความชอบด้านเนื้อสัมผัสมากที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้ร่วมกับคาราจีแนน ร้อยละ 0.0 และ 0.5 จากการทดสอบความพอดี (JAR) ค่า Net score แสดงให้เห็นว่าควรพัฒนาเนื้อสัมผัสให้มีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น การวิจัยต่อมาพบว่า การใช้คาราจีแนนร่วมกับกลูโคแมนแนน (1:1) ร้อยละ 0.25 ของน้ำหนักสูตรเหมาะสมที่สุด ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่าความเป็นกรดด่าง และค่าความแข็ง เท่ากับ 13.10 องศาบริกซ์ 2.93 และ 82.14 กรัม ตามลำดับ และมีคะแนนความชอบโดยรวมที่ระดับ) 7 ชอบปานกลาง (

ABSTRACT

This research aims to develop the texture of roselle jelly drink with okra mucilage and basil seed mucilage (mixed mucilage) by carrageenan, konjac glucomannan, and locus bean gum. Result showed that the mixed mucilage made the hardness higher than that of without mixed mucilage at the same carrageenan level ($p\leq0.05$). Mixed mucilage with Carrageenan 0.25% (w/w) had the highest overall liking score and texture liking score than with Carrageenan 0% and 0.5% (w/w). Net score by Just about right test (JAR) showed that the firmness of texture should be increased to increase liking score. Next study showed that the suitable formulation was the combination of carrageenan with glucomannan (1:1) 0.25% (w/w). Total soluble solid, pH, and hardness of finished product were 13.10 °Brix, 2.93 and 82.14 g, respectively. The overall liking score was rated at 7 (moderately like).

Key words: Roselle Jelly drink, Texture, Sensory Characteristics

* Corresponding author; e-mail address: fagiavj@ku.ac.th

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

กระเจี๊ยบเขียวและเมล็ดแมงลักเป็นผลผลิตทางธรรมชาติที่สามารถหาได้ในประเทศ และมีประโยชน์ต่อร่างกาย กระเจี๊ยบเขียวมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench อยู่ในวงศ์ Malvaceae เป็นพืชที่มีใยอาหารสูงและมีสารประกอบฟีนอลิกที่มีฤทธิ์ในการต่อต้านอนุมูลอิสระ (Roy *et. al*, 2014) ช่วยลดคอเลสเตอรอลในเลือด ลดความเสี่ยงโรคหัวใจและช่วยในการทำงานของระบบขับถ่าย (Gemede *et. al*, 2014) เมล็ดแมงลักเป็นอีกหนึ่งวัตถุดิบที่มีปริมาณใยอาหารสูง เมื่อรับประทานจะรู้สึกอิ่มท้องแต่ไม่ให้พลังงาน จึงนิยมนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เช่น การเติมเมล็ดแมงลักในเครื่องดื่มน้ำผลไม้ทำให้โปรตีนและใยอาหารสูงขึ้นและช่วยเพิ่มความคงตัวของผลิตภัณฑ์ (Hajmohammadi *et. al*, 2016) ทั้งกระเจี๊ยบเขียวและเมล็ดแมงลักมีสารเมือก หรือที่เรียกว่า มิวซิเลจ เป็นสารประเภทพอลีแซกคาไรด์ ซึ่งมีหน้าที่และคุณสมบัติต่าง ๆ ช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัส เป็นสารอิมัลซัน สารเพิ่มความหนืด และสารก่อให้เกิดเจลในอาหาร เป็นต้น สารก่อให้เกิดเจล หรือไฮโดรคอลลอยด์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารในอาหารประเภทเจลอย่างแพร่หลาย เพื่อช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัส เพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มความคงตัวของของเจล สารที่นิยมใช้ ได้แก่ คาราจีแนน อะการ์ เจลาติน เพคติน เป็นต้น และมักใช้ร่วมกับสารไฮโดรคอลลอยด์ หรือกัม เพื่อคุณสมบัติที่ดีขึ้น (Synergy) การใช้คาราจีแนนร่วมกับโลคัสบีนกัมทำให้เจลมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น (Firmness) และการใช้คาราจีแนนร่วมกับกลูโคแมนแนนทำให้เจลมีความยืดหยุ่นและทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น (Gel strength) (BeMiller, 2011)

จากการศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์เยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่มที่มีส่วนผสมของเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลัก พบว่า เนื้อสัมผัสมีผลต่อคะแนนความชอบโดยรวมของผู้ทดสอบมากที่สุด การศึกษานี้จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาปริมาณสารก่อให้เกิดเจลที่เหมาะสม (คาราจีแนน) และผลของคาราจีแนน กลูโคแมนแนนจากผงบุก และโลคัสบีนกัม ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

คาราจีแนน (Satiagel ME5) จาก บริษัท อินเกรเดียน เซ็นต์เธอร์ จำกัด กลูโคแมนแนนจากผงบุก)Purified Konjac Powder ST-CH-38(บริษัท มังคิ คิง ฟูด จำกัด และโลคัสบีนกัม (Snowflake LBG A-02) จาก บมจ. เบรนน์แท็ก อินกรีเดียนส์ (ประเทศไทย)

การเตรียมตัวอย่าง

ชั่งส่วนผสมสำหรับสูตร 500 กรัม ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Pioneer รุ่น PA4102, USA) ได้แก่ น้ำกระเจี๊ยบเข้มข้น 50 กรัม น้ำตาลทราย 60 กรัม กรดซิตริก 1.0 กรัม เกลือป่น 0.5 กรัม และตัวแปรที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ปริมาณเมือกผสม (ปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลัก อัตราส่วน 1:1) ปริมาณน้ำ คาราจีแนน กลูโคแมนแนน และโลคัสบีนกัม ในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามแผนการทดลอง (Table 1)

วิธีการเตรียมเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่ม ดัดแปลงจากวิธีของ Novelina *et. al* (2016) ชั่งสวนผสมทั้งหมด นำ น้ำตาล เกลือ คาราจีแนน กลูโคแมนแนน และโลคัสบีนกัม ผสมให้เข้ากัน ค่อย ๆ เทใส่ในน้ำ ให้ความร้อนบนแผ่นให้ความร้อน (Hot Plate) จนส่วนผสมมีอุณหภูมิ 60±2 °C คนจนส่วนผสมทั้งหมดละลายจากนั้นเติมเมือกผสม แล้วใช้ตะกร้อมือคนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ปรับเพิ่มอุณหภูมิจนส่วนผสมมีอุณหภูมิ 90±2 °C นาน 10

นาที ยกลงจากเตา เมื่อส่วนผสมมีอุณหภูมิลดลงจนถึง 70±2 °C เติมกรดซิตริกและน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้น คนให้ส่วนผสมเข้ากัน บรรจุขณะร้อนในถุงฟอยด์สำหรับบรรจุอาหาร (Food Grade) ความหนา 200 ไมครอน ที่มีจุกเปิดปิด แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วโดยแช่ในน้ำแข็ง 5 นาที เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5±2 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพและทดสอบทางประสาทสัมผัส

การศึกษาปริมาณสารก่อให้เกิดเจลที่เหมาะสม (คาราจีแนน) และผลของกลูโคแมนแนนจากผงบุก และโลคัสบีนกัม ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส

การวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของปริมาณสารก่อให้เกิดเจลที่เหมาะสม) คาราจีแนน) ต่อเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและลักษณะทางประสาทสัมผัส โดยศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเมือกผสม ร้อยละ 0 และ 33 และปริมาณคาราจีแนน ร้อยละ 0.00 0.25 และ 0.50 ของน้ำหนักสูตร จำนวน 6 สิ่งทดลอง (Table 1: Part I) จากนั้นนำผลที่ได้พัฒนาต่อในส่วนที่ 2 อัตราส่วนของสารก่อให้เกิดเจลและไฮโดรคอลลอยด์ ต่อเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและลักษณะทางประสาทสัมผัส ได้แก่ คาราจีแนน กลูโคแมนแนน โลคัสบีนกัม สารผสมคาราจีแนนและกลูโคแมนแนน (1:1) และสารผสมคาราจีแนนและโลคัสบีนกัม (1:1) จำนวน 5 สิ่งทดลอง กำหนดปริมาณสารก่อให้เกิดเจลและไฮโดรคอลลอยด์ โดยใช้ผลที่ได้จากการวิจัยส่วนที่ 1 ที่ร้อยละ 0.25 (Table 1: Part II) วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่ากรดด่าง (pH) เนื้อสัมผัสด้านความแข็ง (Hardness) และทดสอบทางประสาทสัมผัส

Table 1 Formulations of roselle jelly drink (treatment A and B).

Ingredient (%)	Part I						Part II				
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5
Drinking Water	77.70	77.45	77.20	44.70	44.45	44.20	44.45	44.45	44.45	44.45	44.45
Roselle juice	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Sugar	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Citric Acid	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Salt	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mixed Mucilage (1:1)	0	0	0	33	33	33	33	33	33	33	33
Carrageenan	0	0.25	0.50	0	0.25	0.50	0.25	0	0	0.125	0.125
Glucomannan	-	-	-	-	-	-	0	0.25	0	0.125	0
Locust Bean Gum	-	-	-	-	-	-	0	0	0.25	0	0.125
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

การวิเคราะห์คุณภาพ

บีบตัวอย่างผ่านฝาจุกถุงฟอยด์ใส่ในถ้วยพลาสติก ใช้ช้อนคนตัวอย่างส่วนเนื้อเจลและน้ำให้เข้ากัน วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ด้วยเครื่อง Pocket Refractometer (PAL-3, Japan) วิเคราะห์และบันทึกค่าในหน่วย องศาบริกซ์ (°Brix) วิเคราะห์ค่ากรดด่าง (pH) ด้วย pH meter (Eutech Instruments pH 700, Singapore) วิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้านความแข็ง (Hardness) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Hurler *et. al* (2012) ด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA.XT plus, USA) ใช้ชุดอุปกรณ์ Back Extrusion Rig หัววัด A/BE-d48 เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร บรรจุตัวอย่างสูง 25 มิลลิเมตร กดตัวอย่าง 12.5 มิลลิเมตร บันทึกค่า ในหน่วย กรัม โดยวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างที่อุณหภูมิ 20±2° C จำนวน 3 ซ้ำ

การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดสอบทางประสาทสัมผัส ความชอบด้านคุณลักษณะต่าง ๆ ด้วยวิธี 9-point Hedonic scale ร่วมกับการทดสอบความพอดี ด้วยวิธี Just about right ผู้ทดสอบเป็นผู้บริโภคทั่วไปที่รับประทานผลิตภัณฑ์เยลลี่พร้อมดื่ม จำนวน 30 คน เสิร์ฟตัวอย่างพร้อมบรรจุภัณฑ์อุณหภูมิ 20±2 °C ให้กับผู้ทดสอบตามลำดับการเสิร์ฟแบบสุ่ม ผู้ทดสอบชิมตัวอย่างผ่านจุกเปิดของถุงบรรจุภัณฑ์ ประเมินคุณลักษณะและให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวม เนื้อสัมผัส รสหวาน รสเปรี้ยว และความชอบโดยรวมของแต่ละตัวอย่างลงในแบบทดสอบ โดยใช้สเกลคะแนนความชอบ 1-9 ระดับ โดย 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด และ 1 ไม่ชอบมากที่สุด และสเกลความพอดี 1-5 โดย 1 หมายถึง น้อยเกินไป 3 หมายถึงพอดี และ 5 หมายถึง มากเกินไป

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติด้วย Analysis of variance (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95) %$p \leq 0.05$ (โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (SPSS for Windows version 12) และวิเคราะห์ผล Just about right ด้วยวิธี Net score (Net score>20%)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของปริมาณสารก่อให้เกิดเจลที่เหมาะสม (คาราจีแนน) ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส

จากการทดลอง พบว่า เมือกผสมมีสีตามธรรมชาติจึงส่งผลให้สีของสิ่งทดลองเข้มขึ้น (Figure 1) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสิ่งทดลองอยู่ในช่วง 13.3-13.9 ºBrix และค่า pH อยู่ในช่วง 2.6-3.0 เมือกผสมและปริมาณคาราจีแนนมีอิทธิพลต่อเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง สิ่งทดลองที่มีเมือกผสมจะมีความแข็งมากกว่าสิ่งทดลองที่ไม่มีเมือกผสมที่ระดับคาราจีแนนเดียวกัน เนื่องจากมีปริมาณสารก่อให้เกิดเจลสูงกว่าจากทั้งคาราจีแนนที่มีคุณสมบัติเป็นสารก่อให้เกิดเจล (Blakemore and Harpell, 2010) และเมือกผสมที่มีสารประเภทพอลีแซกคาไรด์ จำพวกกัมและเพกติน ที่ช่วยให้เกิดเจล (Gemede *et. al*, 2014) สิ่งทดลองที่มีปริมาณคาราจีแนนสูงจะมีค่าความแข็งมากกว่าสิ่งทดลองที่มีปริมาณคาราจีแนนต่ำกว่า ($p \leq 0.05$) (Table 2)

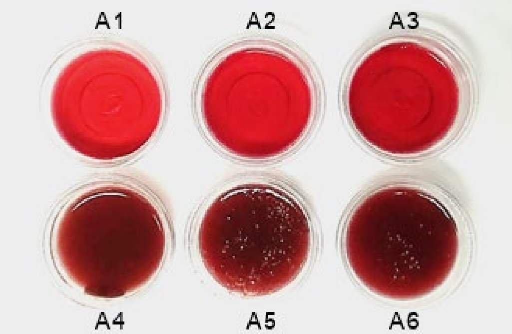


Figure 1 Appearance of roselle jelly drink without packaging in part I (treatment A1-A6).

Table 2 Quality of roselle jelly drink in part I (treatment A1-A6).

Treatment	Mixed Mucilage	Carrageenan (%)	TTS (°Brix)	pH	Hardness (g)
A1	0.00	0.00	13.30 ± 0.00[c]	2.64 ± 0.02[b]	na
A2	0.00	0.25	13.33 ± 0.10[c]	2.64 ± 0.00[b]	47.50 ± 4.02[d]
A3	0.00	0.50	13.37 ± 0.12[c]	2.65 ± 0.01[b]	210.80 ± 3.00[b]
A4	33.00	0.00	13.40 ± 0.00[c]	2.99 ± 0.01[a]	33.11 ± 0.93[e]
A5	33.00	0.25	13.90 ± 0.00[a]	3.02 ± 0.01[a]	94.57 ± 3.74[c]
A6	33.00	0.50	13.68 ± 0.13[b]	3.00 ± 0.01[a]	222.70 ± 3.93[a]

[a-e] - Different letters in the same column indicated significant difference ($p \leq 0.05$)

na - Hardness cannot be measured.

เมื่อนำสิ่งทดลองที่มีเมือกผสม (A4 A5 และ A6) มาทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวม รสหวาน และรสเปรี้ยวของแต่ละสิ่งทดลองไม่แตกต่างกัน (p>0.05) ความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวมอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง ความชอบรสหวานและรสเปรี้ยวอยู่ในระดับชอบปานกลาง ในขณะที่ความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ของคะแนนความชอบด้านต่างๆ (Correlation) พบว่า คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด (r = 0.7, $p \leq 0.01$) ในทิศทางเดียวกัน (เชิงบวก (คือ เมื่อคะแนนความชอบเนื้อสัมผัสสูงขึ้น คะแนนความชอบโดยรวมจะสูงขึ้นตามไปด้วย สิ่งทดลอง A5 (คาราจีแนน 0.25%) มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดที่ 6.5 และ 6.8 คะแนน ตามลำดับ (Table 3) เมื่อทดสอบความพอดีและวิเคราะห์ผลด้วยวิธี Net score พบว่า A5 มีรสหวานและรสเปรี้ยวอยู่ในเกณฑ์พอดี)Net score ≤20%) และควรพัฒนาเนื้อสัมผัสให้มีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น (Table 4)

Table 3 Liking score of roselle jelly drink in part I (treatment A4-A6).

Treatment	Overall flavor[ns]	Texture	Sweetness[ns]	Sourness[ns]	Overall liking
A4	6.8 ± 0.9	5.1 ± 1.1[c]	7.0 ± 0.9	7.1 ± 0.8	5.7 ± 1.0[c]
A5	7.0 ± 0.9	6.5 ± 0.7[a]	7.1 ± 0.9	7.0 ± 0.9	6.8 ± 0.8[a]
A6	6.5 ± 1.0	5.8 ± 1.2[b]	7.2 ± 0.6	7.1 ± 0.8	6.2 ± 1.0[b]

[a-c] - Different letters in the same column indicated significant difference ($p \leq 0.05$)

[ns] - Not significant (p>0.05)

Table 4 Net score for improvement .

Attributes	Responses (%)			Net score
	Too much	JAR	Not enough	
Firmness	0	60	40	(-) 40
Sweetness	0	90	10	(-) 10
Sourness	3	77	20	(-) 17

(+) Too much, should be adjusted to decrease; (-) Not enough, should be adjusted to increase

ผลของคาราจีแนน กลูโคแมนแนนจากผงบุก และโลคัสบีนกัม ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส

จากการวิจัยส่วนแรก พบว่า เนื้อสัมผัสของเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่มมีผลต่อคะแนนความชอบโดยรวมของผู้ทดสอบ จึงปรับปรุงและพัฒนาเนื้อสัมผัสโดยใช้คาราจีแนน กลูโคแมนแนนจากผงบุก โลคัสบีนกัม และสารผสม การศึกษาพบว่า สิ่งทดลอง B1 สามารถเกิดเจลได้ โดยเจลที่ได้มีลักษณะเปราะแข็ง) Brittle(ซึ่งเป็นลักษณะของเจลที่เกิดจากคาราจีแนน B2 มีลักษณะเป็นก้อนเจลหยืดหยุ่น ขนาดปานกลาง กระจายตัว ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีปริมาณน้ำค่อนข้างมาก เนื่องจากความเข้มข้นของกลูโคแมนแนนไม่เหมาะสม โดยจะสามารถเกิดเจลได้เมื่อมีความเข้มข้น ร้อยละ 2-5 และ B3 เป็นของเหลวข้นหนืด เนื่องจากโลคัสบีนกัม ไม่สามารถก่อให้เกิดเจลในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้เพียงชนิดเดียว)BeMiller, 2011; Parry, 2009 (ในขณะที่การใช้สารผสมคาราจีแนนร่วมกับกลูโคแมนแนน) B4) เกิดเจลที่มีลักษณะหยืดหยุ่น มีความต้านทานแรงกระแทกสูง ต้องใช้ความพยายามในการเคี้ยว และการใช้สารผสมคาราจีแนนร่วมกับกลูโคแมนแนน) B5) เกิดเจลที่มีลักษณะนิ่ม มีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น และง่ายในการเคี้ยวกลืน เมื่อวิเคราะห์คุณภาพ พบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสิ่งทดลองอยู่ในช่วง 13.1-13.6 ^{o}Brix และค่า pH อยู่ในช่วง 2.8-3.0 ซึ่งไม่แตกต่างจากผลการวิจัยในส่วนแรก สิ่งทดลองที่ใช้สารผสมมีค่าความแข็งมากขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้กลูโคแมนแนน หรือโลคัสบีนกัมเพียงชนิดเดียว ($p \le 0.05$) เนื่องจากการเสริมแรงของสารผสม (Synergy) ทำให้โครงสร้างเจลแข็งแรงขึ้น มีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น เพิ่มความหยืดหยุ่น และลดการ Syneresis (Brenner, 2015; Blakemore and Harpell, 2010) (Table 5)

การทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบกลิ่นรสโดยรวมแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และให้คะแนนความชอบด้านรสหวานและรสเปรี้ยวไม่แตกต่างกัน (p>0.05) ที่ระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง ในขณะที่คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมของสิ่งทดลองแตกต่างกัน ($p \le 0.05$) สิ่งทดลอง B4 และ B5 มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดที่ 6.7 และ 7.0 คะแนน ตามลำดับ) p>0.05) แต่สิ่งทดลอง B5 มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสสูงสุด จึงพิจารณาให้เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด (Table 6)

Table 5 Quality of roselle jelly drink in part II (treatment B1-B5).

Treatment	Carrageenan (%)	Glucomannan (%)	Locust Bean Gum (%)	TSS (°Brix)	pH[ns]	Hardness (g)
B1	0.250	0.000	0.000	13.60 ± 0.00[a]	2.89 ± 0.01	92.54 ± 5.07[b]
B2	0.000	0.250	0.000	13.57 ± 0.06[a]	2.92 ± 0.00	52.59 ± 1.80[d]
B3	0.000	0.000	0.250	13.23 ± 0.06[c]	2.92 ± 0.01	55.03 ± 2.80[d]
B4	0.125	0.125	0.000	13.43 ± 0.12[b]	2.94 ± 0.01	112.05 ± 11.18[a]
B5	0.125	0.000	0.125	13.10 ± 0.00[d]	2.93 ± 0.01	82.14 ± 1.10[c]

[a-d] - Different letters in the same column indicated significant difference ($p \leq 0.05$)

[ns] - Not significant ($p > 0.05$)

Table 6 Liking score of roselle jelly drink in part II (treatment B1-B5).

Treatment	Overall flavor	Texture	Sweetness[ns]	Sourness[ns]	Overall liking
B1	6.8 ± 0.6[ab]	6.6 ± 0.6[b]	6.8 ± 0.6	7.0 ± 0.6	6.6 ± 0.6[b]
B2	6.4 ± 0.6[c]	5.5 ± 0.8[d]	6.9 ± 0.5	6.8 ± 0.7	6.0 ± 0.6[c]
B3	6.5 ± 0.6[bc]	6.1 ± 0.6[c]	6.7 ± 0.5	6.7 ± 0.4	6.3 ± 0.5[c]
B4	6.6 ± 0.6[abc]	6.4 ± 0.6[b]	6.8 ± 0.7	6.9 ± 0.6	6.7 ± 0.5[ab]
B5	6.9 ± 0.5[a]	7.0 ± 0.5[a]	6.8 ± 0.8	6.9 ± 0.6	7.0 ± 0.5[a]

[a-d] - Different letters in the same column indicated significant difference ($p \leq 0.05$)

[ns] - Not significant ($p > 0.05$)

สรุป

การวิจัยส่วนที่ 1 พบว่า เมื่อเติมเมือกผสมในเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่มส่งผลต่อสีที่ปรากฏ ค่าความเป็นกรดด่างและเนื้อสัมผัส สิ่งทดลองที่มีเมือกผสมจะมีความแข็งมากกว่าสิ่งทดลองที่ไม่มีเมือกผสมที่คาราจีแนนระดับเดียวกัน การใช้คาราจีแนน ร้อยละ 0.25 ทำให้คะแนนความชอบโดยรวมของผู้ทดสอบสูงที่สุดที่ระดับชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง) 6.8) และผู้ทดสอบต้องการให้มีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น การวิจัยส่วนที่ 2 พบว่า เมื่อพัฒนาเนื้อสัมผัสโดยใช้สารคาราจีแนนร่วมกับโลคัสบีนกัม (1:1) ที่ร้อยละ 0.25 เกิดเจลที่มีลักษณะนิ่มและมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น ทำให้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมสูงขึ้นที่ระดับชอบปานกลาง (7.0) และมีค่าคุณภาพดังนี้ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 13.10 °Brix ความเป็นกรดด่าง 2.93 และความแข็ง 82.14 กรัม ในการพัฒนาต่อควรศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ส่งเสริมสุขภาพมากขึ้น เช่น การลดปริมาณน้ำตาล เพื่อทางเลือกสำหรับผู้บริโภคที่รักษาสุขภาพ

เอกสารอ้างอิง

BeMiller, J.N. 2011. Hydrocolloids. In E. Arendt & F.D. Bello (Eds.), **Gluten-Free Cereal Products and Beverages** (pp. 203-214): Elsevier Science.

Blakemore, W.R. and A.R. Harpell. 2010. Carrageenan. **Food stabilisers, thickeners and gelling agents**. 73-94.

Brenner, T., R. Tuvikene, Y. Fang, S. Matsukawa and K. Nishinari. 2015. Rheology of Highly Elastic Iota-Carrageenan/Kappa-Carrageenan/Xanthan/Konjac Glucomannan Gels. **Food Hydrocolloids**. 44:136-144.

Gemede, H.F., N. Ratta, G.D. Haki, A.Z. Woldegiorgis and F. Bey. 2014. Nutritional Quality and Health Benefits of Okra (Abelmoschus Esculentus): A Review. **Global Journal of Medical Research**. 14(5): 28-37.

Hajmohammadi, A., M. Pirouzifard, M. Shahedi and M. Alizadeh. 2016. Enrichment of a Fruit-Based Beverage in Dietary Fiber Using Basil Seed: Effect of Carboxymethyl Cellulose and Gum Tragacanth on Stability. **LWT - Food Science and Technology**. 74: 84-91.

Hurler, J., A. Engesland, B. Poorahmary Kermany and N. Škalko-Basnet. 2012. Improved Texture Analysis for Hydrogel Characterization: Gel Cohesiveness, Adhesiveness, and Hardness. **Journal of Applied Polymer Science** 125(1): 180-188.

Novelina, N. Nazir and M.R. Adrian. 2016. The Improvement Lycopene Availability and Antioxidant Activities of Tomato (Lycopersicum Esculentum, Mill) Jelly Drink. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**. 9: 328-334.

Parry, J. M. 2009. Konjac Glucomannan. In A. Imeson (Ed.), **Food stabilisers, thickeners and gelling agents** (pp. 198-217): Blackwell Publishing Ltd, n.p.

Roy, A., S.L. Shrivastava and S.M. Mandal. 2014. Functional Properties of Okra Abelmoschus Esculentus L. (Moench): Traditional Claims and Scientific Evidences. **Plant Science Today** 1(3): 121-130.

การพัฒนาเค้กสปันจ์ลดแคลอรี่เพื่อสุขภาพ ด้วยแป้งมันม่วงและอินูลิน

Development of Healthy Reduced-calorie Sponge Cake with Purple Sweet Potato Flour and Inulin

ชัญญา สิทธิอำนวย[1] และ เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล[1*]

Chanya Sithiaumnuai[1] and Saowanee Lertworasirikul[1*]

บทคัดย่อ

ในประเทศไทย ปัจจุบันผลิตภัณฑ์เค้กชนิดต่างๆ ในท้องตลาดมักให้พลังงานสูง ไขมันสูง และคุณค่าทางโภชนาการต่ำ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เค้กสปันจ์ลดพลังงานและลดไขมัน เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ โดยการใช้แป้งมันม่วงทดแทนแป้งเค้กบางส่วน และใช้อินูลินทดแทนน้ำมันและน้ำตาลในเค้กสปันจ์ โดยผลการพัฒนาผลิตภัณฑ์เค้กสปันจ์ลดพลังงานเพื่อสุขภาพนี้พบว่าเมื่อทดแทนอินูลินในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีไขมันและน้ำตาลลดลง เส้นใยอาหารมากขึ้น ผลจากการทดแทนแป้งเค้กด้วยแป้งมันม่วงซึ่งให้พลังงานต่ำกว่าแป้งเค้ก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เค้กสปันจ์มีพลังงานลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสูตรที่พัฒนาได้นี้สามารถทดแทนแป้งเค้กด้วยแป้งมันม่วงได้มากถึงร้อยละ 50 และสามารถใช้อินูลินทดแทนไขมันและน้ำตาลได้ร้อยละ 40และร้อยละ20 ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดพลังงานไปได้ร้อยละ 29.18 จากสูตรปกติ และจากการทดสอบความชอบของผู้บริโภคด้วยวิธี 9-pointed hedonic scale test ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้คะแนนความชอบโดยรวมจากผู้ทดสอบเท่ากับ6.8 ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากคะแนนของเค้กสปันจ์สูตรพื้นฐานนัยสำคัญ ($p>0.05$).

ABSTRACT

In Thailand, presently cake products in the market have high calories, high fat and low nutritional values. The objective of this research was to develop a sponge cake with reduced calorie and reduced oil to be an alternative product for health conscious consumers by using purple sweet potato flour to partially substitute cake flour and using inulin to substitute oil and sugar in the sponge cake. The results showed that when using higher inulin, the product had lower oil and sugar contents and had higher fiber content. The results from partially substituting cake flour with purple sweet potato flour which had lower calories than cake flour showed that the product had obviously lower calories. The developed formula could substitute 50% of cake flour with purple sweet potato flour and could substitute 40% of fat and 20% of sugar with inulin. The developed formula could reduce the amount of calories for 29.18% from basic formula. From the 9-pointed hedonic scale test, the overall liking score of the developed product was 6.8 that was not significantly different from the overall liking score of the basic formula ($p>0.05$).

Key words: sponge cake, inulin, purple sweet potato, reduced calorie

* Corresponding author; e-mail address: saowanee.l@ku.ac.th

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

จากการสำรวจแนวโน้มการบริโภคของผู้บริโภคในปี 2019 (IFIC, 2019) พบว่าในปัจจุบันแนวโน้มการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพของผู้บริโภคนั้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทั่วโลก อันเนื่องจากกระแสรักสุขภาพและการควบคุมน้ำหนักที่มากขึ้น โดยแนวทางการควบคุมน้ำหนักที่เป็นที่นิยมสูงที่สุดอันดับ 1 ได้แก่ การบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพแคลอรี่ต่ำ (Low-Calorie Food) รองลงมาคือการรับประทานอาหารแบบจำกัดช่วงเวลา (Intermittent Fasting (โดยสาเหตุหลักของการควบคุมน้ำหนักหรือดูแลสุขภาพ อันเนื่องจากผู้บริโภคต้องการลดน้ำหนักและต้องการรู้สึกแข็งแรงมากขึ้น

ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่หรือผลิตภัณฑ์ขนมอบนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ให้พลังงานสูง ไขมันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขนมเค้ก ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือแป้ง น้ำตาลและไขมัน ซึ่งเป็นแหล่งของพลังงาน จากการศึกษาข้อมูลพบว่ามีงานวิจัยที่พัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมเค้กด้วยการทดแทนไขมันและน้ำตาลโดยวัตถุดิบต่างๆ มากมาย อาทิ การใช้เนื้อผลไม้ (Fruit Puree) ไขมันทางเลือก (Alternative Fat) สารให้ความหวาน (Sweetener) ต่างๆ หรือการพัฒนาเค้กในรูปแบบมังสวิรัติ ล้วนแต่เป็นการพัฒนาเค้กเพื่อสุขภาพซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดีมีประโยชน์ แต่เนื้อสัมผัสและรสชาติของผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจทำให้ผู้บริโภคยังไม่ให้การยอมรับมากเท่าที่ควร จากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาสูตรเค้กเพื่อสุขภาพที่ให้พลังงานน้อย ไขมันน้อย ซึ่งมีเนื้อสัมผัสและรสชาติที่ผู้บริโภคให้การยอมรับมากที่สุดเป็นหลัก โดยใช้เกณฑ์การวัดจากการทดสอบความชอบและความพอดีด้วยวิธี 9 Point Hedonic Scale Test และ Just About Right Test ตามลำดับโดยการใช้แป้งมันม่วงและอินูลินในการพัฒนา ซึ่งแป้งมันม่วงทำมาจากมันม่วงที่จัดเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่ให้คุณประโยชน์สูง และให้พลังงานต่ำ ซึ่งพลังงานที่ได้รับจากการบริโภคมันม่วงสดมีเพียง 1-0.7 กิโลแคลอรี่/1กรัม โดยประมาณ (Potatoes USA, 2019) ซึ่งน้อยกว่าพืชผลทั่วไปที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักอย่างมาก เพราะมันม่วงอุดมไปด้วยใยอาหารเป็นองค์ประกอบหลักกล่าวคือมีใยอาหารที่ละลายน้ำได้) Soluble Dietary Fiber (ร้อยละ 23-15 และใยอาหารที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ร้อยละ 85-77 ซึ่งมีส่วนช่วยให้อยู่ท้อง นอกจากนั้นมันม่วงยังอุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุมากมาย รวมถึงสารแอนโธไซยานินหรือสารต้านอนุมูลอิสระที่มีปริมาณมากกว่าพืชตระกูลเบอร์รี่อีกด้วย (ณรงค์, 2558; นิพัทธา และคณะ, ม.ป.ป. (นอกจากนั้นในการพัฒนาสูตรเค้กจะใช้อินูลินซึ่งเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่พบมากในรากชิคอรี่ หัวหอม กระเทียม และแก่นตะวัน อินูลินและโอลิโกฟรุกโตสจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นใยอาหาร มีโครงสร้างเป็นน้ำตาลฟรุกโตส ซึ่งทั้งหมดนี้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β- (1-2)ทำให้อินูลินมีสมบัติเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ ซึ่งร่างกายไม่สามารถย่อยสลายเป็นน้ำตาลสายสั้นๆ เพื่อดูดซึมต่อไปได้จึงให้พลังงานเพียง 1.4-2 กิโลแคลอรี่/1กรัม ช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด และมีค่า Glycemic Index (GI) หรือคือดัชนีระดับน้ำตาลในเลือดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการบริโภคต่ำและมีส่วนช่วยในการขับถ่าย เนื่องจากเป็น Prebiotic ให้กับแบคทีเรียชนิดดีในลำไส้ใหญ่ได้แก่ บิฟิโดแบคทีเรีย (*Bifidobacteria*) แลคโตบาซิลัส (*Lactobacillus*) (ศิริพร และคณะ, 2555)

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาการลดพลังงานในเค้กโดยการใช้มันม่วงและอินูลินร่วมกันโดยเฉพาะ ประกอบกับผู้บริโภคมีความต้องการอาหารเพื่อสุขภาพมีเพิ่มขึ้น ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมเค้กสปันจ์เพื่อสุขภาพ ที่ให้พลังงานน้อยลง โดยการใช้มันม่วงและอินูลินเป็นวัตถุดิบหลักในการพัฒนาจึงเป็นการเพิ่มช่องทางการตลาดของผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพเพิ่มขึ้นอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองสูตรพื้นฐานของเค้กสปันจ์

กระบวนการผลิตเค้กสปันจ์สูตรพื้นฐาน เริ่มโดยการนำ ไข่ น้ำ น้ำตาล และนม มาตีผสมกันด้วยเครื่องตีผสม Kitchen-Aids ด้วยความเร็วสูงเป็นเวลา 3 นาทีหรือจนขึ้นฟู แล้วทำการใส่แป้งเพื่อตีผสมต่อด้วยความเร็วสูงเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงทำการผสมน้ำมันด้วยความเร็วต่ำเป็นเวลา 1 นาที บรรจุส่วนผสมที่ได้ลงในพิมพ์ขนมเค้ก อบด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ ไฟบน 180 องศาเซลเซียส ไฟล่าง 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22-24 นาที ดัดแปลงจาก Bakeryclick (2556) ซึ่งได้ทำการประเมินสูตรพื้นฐาน โดยวิธีให้คะแนนความชอบแบบ 9 point hedonic scales และการทดสอบความพอดี (Just About Right) เพื่อให้ทราบทิศทางพัฒนาสูตรต่อไป

การศึกษาอัตราส่วนของอินูลินทดแทนในน้ำมันและน้ำตาลของเค้กสปันจ์

นำสูตรพื้นฐานของเค้กสปันจ์ ซึ่งดัดแปลงสูตรจากสูตรของ Bakeryclick (2556) ซึ่งประกอบไปด้วย แป้งเค้ก ร้อยละ 18.65 ไข่ไก่เบอร์ 2 ร้อยละ 33.57 น้ำตาลทรายขาว ร้อยละ14.92 น้ำมันถั่วเหลือง ร้อยละ14.92 น้ำร้อยละ6.57 นมจืดพาสเจอร์ไรส์ร้อยละ 7.46 เกลือป่นร้อยละ 0.23 ผงฟูร้อยละ0.93 และสารเสริมความคงตัว SP ร้อยละ 2.8 มาเป็นสูตรควบคุม และนำมาปรับสูตรโดยการทดแทนน้ำมันและน้ำตาลด้วยอินูลินชนิดไซรัปของบริษัท Sensus ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ดีเคเอสเอช (ประเทศไทย) จำกัด จากนั้นศึกษาสัดส่วนการใช้น้ำตาล น้ำมันและอินูลิน โดยวางแผนการทดลองแบบผสม mixture design โดยดัดแปลงจากการศึกษาของ Seo *et. al*. (2010) ซึ่งได้สิ่งทดลองทั้งหมด 4 สิ่งการทดลองโดยทำการแปรผันอัตราส่วนปริมาณของอินูลินร้อยละ 45-30น้ำตาลร้อยละ 40-25 และ น้ำมันร้อยละ45-30 โดยให้ส่วนผสมอื่นคงที่ ดังแสดงใน Table1

Table 1 Mixture design of sponge cake with different levels of inulin.

Treatment	Ratio Sugar: Oil: Inulin	Factors in experiment (%)		
		Sugar	Oil	Inulin
1	25:45:30	7.46	13.43	8.95
2	25:30:45	7.46	8.95	13.43
3	30:35:35	8.95	10.44	10.44
4	40:30:30	11.94	8.95	8.95

จากนั้นนำสิ่งทดลองทั้ง 4 สิ่งทดลองที่ได้ทดสอบเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมโดยการสังเกตลักษณะของเค้กที่ได้ และการวัดความสูงของเค้กหลังอบ โดยวัดที่จุดสูงสุดและต่ำสุดของเค้ก รวมทั้งการคำนวณค่าพลังงานที่ได้ของแต่ละสิ่งทดลอง โดยคำนวณจากค่าพลังงานที่ได้รับจากวัตถุดิบในเค้กสปันจ์คูณกับปริมาณที่ใช้ในเค้กสปันจ์หนึ่งสูตร ซึ่งพลังงานที่ได้รับจากวัตถุดิบแต่ละชนิด มีค่าดังนี้ แป้งเค้ก 4 กิโลแคลอรี่/กรัม น้ำตาล 4 กิโลแคลอรี่/กรัม ไข่ไก่ 1.45 กิโลแคลอรี่/กรัม น้ำมัน 9 กิโลแคลอรี่/กรัม นม 4 กิโลแคลอรี่/กรัม ผงฟู 2 กิโลแคลอรี่/กรัม สารเสริม SP 3 กิโลแคลอรี่/กรัม และอินูลินซึ่งให้พลังงาน 2-1.4 กิโลแคลอรี่/กรัม (ศิริพร และคณะ, 2555) ดังนั้นจากสูตรควบคุมสำหรับเค้กสปันจ์ 1 ปอนด์ (4000 กรัม) ซึ่งประกอบด้วยแป้งเค้ก 100 กรัม ไข่ 180 กรัม น้ำตาล 80 กรัม น้ำมัน 80 กรัม น้ำ 35 กรัม นม 40กรัม เกลือ 1.2กรัม ผงฟู 5 กรัม และ สารเสริม SP 15กรัม จะได้พลังงานทั้งหมด 1914.20 กิโลแคลอรี่/ 536.23 กรัมของวัตถุดิบ ซึ่งเมื่อคิดเป็นน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยบริโภคหรือคือ 55 กรัม อ้างอิงจากประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ.2541 ทำให้เค้กสปันจ์หนึ่งสูตรได้เค้กทั้งสิ้น 10 ชิ้นโดยประมาณ ซึ่งจะได้พลังงานทั้งหมด 191.42 กิโลแคลอรี่/ 55 กรัม สำหรับสิ่งทดลองที่ 1 ถึง 4 คำนวณค่าพลังงานเช่นเดียวกันกับสูตรควบคุม และนำสิ่งทดลองไปทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคในด้านสี ความนุ่มฟู ความชุ่มฉ่ำ ความหวาน กลิ่นรส และความชอบโดยรวม โดยวิธีให้คะแนนความชอบแบบ -9point

hedonic scales และทดสอบความพอดีด้านสี ความนุ่มฟู ความชุ่มฉ่ำ และรสหวาน แบบ -3point just about right โดยใช้ผู้บริโภคกลุ่มวัยเรียนและวัยทำงานจำนวน 30 คนแล้ววิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เพื่อหาสูตรในการพัฒนาขั้นต่อไป

การศึกษาสัดส่วนแป้งมันม่วงทดแทนในแป้งเค้กของเค้กสปันจ์

จากการพัฒนาสูตรเค้กสปันจ์ที่ทดแทนน้ำมันและน้ำตาลด้วยอินูลิน นำสูตรที่คัดเลือกได้มาศึกษาต่อในการทดแทนอัตราส่วนของแป้งเค้กด้วยแป้งมันม่วงของบริษัท LianFu Food ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ดีเคเอสเอช (ประเทศไทย) จำกัด เช่นกัน โดยการวางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) ซึ่งได้ทำการปรับอัตราส่วนของแป้งเค้กทดแทนด้วยแป้งมันม่วงเป็นร้อยละ 75 50 25 และ 0 (ตัวอย่างควบคุม) โดยดัดแปลงอัตราส่วนจากการศึกษาของ นันท์ยง (2561) รวมทั้งหมด 4 สิ่งทดลองดัง Table2

Table 2 Ratio of purple sweet potato flour to substitute cake flour in sponge cake.

Ingredients	TRT1 (0%)	TRT2 (25%)	TRT3 (50%)	TRT4 (75%)
Sugar	11.94	11.94	11.94	11.94
Oil	8.95	8.95	8.95	8.95
Inulin	8.95	8.95	8.95	8.95
Eggs	33.57	33.57	33.57	33.57
Cake Flour	18.65	13.99	9.33	4.66
Purple Sweet Potato Flour	0	4.66	9.33	13.99

ดัดแปลงจาก : นันท์ยง (2561)

จากนั้นนำสิ่งทดลองทั้ง 3 สิ่งทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับสูตรที่ทดแทนเพียงอินูลินเดิม) ตัวอย่างควบคุม) โดยการสังเกตลักษณะของเค้กที่ได้ และการวัดความสูงของเค้กหลังอบ โดยวัดที่จุดสูงสุดและต่ำสุดของเค้ก รวมทั้งการคำนวณค่าพลังงานที่ได้ของแต่ละสิ่งทดลองโดยคำนวณจากค่าพลังงานที่ได้รับจากวัตถุดิบเช่นเดียวกันกับการทดลองแทนที่ด้วยอินูลิน โดยแป้งมันม่วงจะให้พลังงานอยู่ที่ 1 กิโลแคลอรี่/กรัม (Potatoes USA, 2019) และทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธีการให้คะแนนความชอบ -9point hedonic scale ทดสอบกับผู้บริโภคในช่วงวัยเรียนและวัยทำงาน 30 คนเพื่อคัดเลือกสูตรที่ผู้บริโภคยอมรับมากที่สุดโดยมีคุณลักษณะที่ทดสอบคือ สี ความนุ่มฟู ความชุ่มฉ่ำ ความหวาน กลิ่นรสมันม่วง และความชอบโดยรวม และทำการทดสอบความพอดี -3point just about right เพื่อศึกษาความพอดีของ สี ความนุ่มฟู ความชุ่มฉ่ำ รสหวาน และกลิ่นรสมันม่วง เพื่อหาแนวทางในการปรับคุณลักษณะให้ได้สูตรเค้กพลังงานต่ำที่ผู้บริโภคยอมรับมากที่สุด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลจากการทดลองสูตรพื้นฐานของเค้กสปันจ์

จากผลการทดลองตาม Table3 และ Table 4 พบว่า คะแนนความชอบโดยรวมของเค้กสปันจสูตรพื้นฐาน (Bakeryclick, 2556) ได้คะแนนความชอบโดยรวมอยู่ที่ 7.20 ซึ่งจัดอยู่ในระดับชอบปานกลางและได้คะแนนความชอบด้านสีและกลิ่นรสสูงถึงระดับปานกลางเช่นกันคือ 7.13 และ 7.00 ตามลำดับ ซึ่งจากการทำการทดสอบความพอดีแบบ 3-point Just about right ดัง Table 4 พบว่าได้รับคะแนนความพอดีในทุกด้าน เกินร้อยละ 70 ซึ่งไม่ต้องปรับคุณลักษณะในด้านใด จึงเลือกสูตรนี้เป็นสูตรพื้นฐานหลักในการพัฒนา

Table 3 Liking scores of basic sponge cake formula.

	TRT1 ($\bar{X} \pm S.D$)
Color	7.13±1.02
Texture	6.70±1.39
Moisture	6.80±1.40
Sweetness	6.90±1.31
Flavor	7.00±0.98
Overall liking	7.20±1.31

ดัดแปลงจาก : Bakeryclick (2556)

Table 4 Just about right scores of basic sponge cake formula.

TRT		Frequency			%			Net	
		NE	JAR	TM	NE	JAR	TM	Score	
1	Color	5	23	2	16.67	76.67	6.67	-	No
	Texture	3	26	1	10.00	86.67	3.33	-	No
	Moisture	3	26	1	10.00	86.67	3.33	-	No
	Sweetness	1	24	5	3.33	80.00	16.67	-	No
	Flavor	2	27	1	6.67	90.00	3.33	-	No

NE, JAR, TM are not enough, just about right and too much of just about right test, respectively

The word (No) in the right column indicates the result that does not have to adjust in that attribute

ผลจากการทดแทนน้ำตาลและน้ำมันด้วยอินูลิน

สิ่งทดลองที่ 1 (อัตราส่วน น้ำตาล:น้ำมัน:อินูลิน 25:45:30)

คุณลักษณะ: เนื้อเค้กมีความแน่นเนื้อสูง ชุ่มฉ่ำ และไม่ขึ้นฟูมากนัก เค้กยุบตัวค่อนข้างมากเมื่อตั้งทิ้งไว้ดัง Figure 1 และมีกลิ่นรสไข่ชัดเจน และมีพลังงานอยู่ที่ 177.82 กิโลแคลอรี่

ความสูงของเค้กหลังอบ: จุดสูงที่สุดอยู่ที่ 4 cm และจุดที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 3 cm

Figure 1 Sponge treatment 1.

สิ่งทดลองที่ 2 (อัตราส่วน น้ำตาล:น้ำมัน:อินูลิน 25:30:45)

คุณลักษณะ: ดัง Figure 2 จะพบว่าเค้กขึ้นฟูได้ดี เค้กไม่ยุบตัวเมื่อตั้งทิ้งไว้ อีกทั้งมีฟองอากาศค่อนข้างสม่ำเสมอ เทียบเท่าสูตรพื้นฐาน และมีพลังงานอยู่ที่ 161.02 กิโลแคลอรี่

ความสูงของเค้กหลังอบ: จุดสูงที่สุดอยู่ที่ 4.5 cm และจุดที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 4.5 cm

Figure 2 Sponge treatment 2.

สิ่งทดลองที่ 3 (อัตราส่วน น้ำตาล:น้ำมัน:อินูลิน 30:35:35)

คุณลักษณ : เนื้อเค้กนุ่มและขึ้นฟูได้ดี แต่ไม่เทียบเท่าสูตรพื้นฐาน หรือสูตรที่ 2 เค้กไม่ยุบตัวเมื่อตั้งทิ้งไว้ มีฟองอากาศค่อนข้างสม่ำเสมอ (Figure 3) และมีพลังงานอยู่ที่168.22 กิโลแคลอรี่

ความสูงของเค้กหลังอบ: จุดสูงที่สุดอยู่ที่ 4 cm และจุดที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 3 5.cm

Figure 3 Sponge treatment 3.

สิ่งทดลองที่ 4 (อัตราส่วน น้ำตาล:น้ำมัน:อินูลิน 40:30:30)
คุณลักษณะ: เนื้อเค้กนุ่มและขึ้นฟูได้ดี มีรสค่อนข้างหวาน ฟองอากาศน้อย แต่ยังขึ้นฟูได้ไม่เทียบเท่าสูตรที่ 2 โดยจาก Figure 4 จะพบว่าเค้กยุบตัวเล็กน้อยเมื่อตั้งทิ้งไว้ และมีพลังงานอยู่ที่165.82 กิโลแคลอรี่
ความสูงของเค้กหลังอบ: จุดที่สูงที่สุดอยู่ที่ 4 cmและจุดที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 3 5.cm

Figure 4 Sponge treatment 4

จากผลการทดลองตาม Table 5 และ Figure 5 จะพบว่า คะแนนความชอบโดยรวมของสูตรทดแทนด้วยอินูลินทั้ง 4 สิ่งทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) โดยมีความชอบโดยรวมของเค้กสปันจ์สูตรทดแทนด้วยอินูลินสิ่งทดลองที่ 4 ได้คะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุดคือ 7.13 และจากการทดสอบความพอดีพบว่าได้คะแนนในทุกคุณลักษณะเกินร้อยละ 70 ซึ่งไม่ต้องทำการปรับด้านใด อีกทั้งสิ่งทดลองที่ 4 ยังให้พลังงานน้อยกว่าสิ่งทดลองที่ 3 คือ 165.82 กิโลแคลอรี่ จึงเลือกสิ่งทดลองที่ 4 ไปพัฒนาต่อ

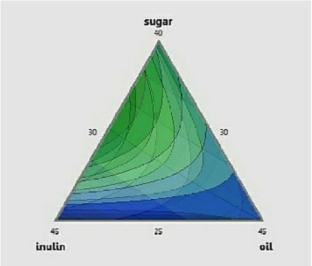


Figure 5 Mixture contour plot of color

Table 5 Liking scores of sponge cake with different levels of inulin

	Control	1	2	3	4
Color	7.17±1.12[a]	6.10±1.20[b]	6.77±1.38[ab]	6.83±1.69[a]	7.00±1.21[a]
Texture	5.80±2.12[b]	6.43±1.45[ab]	6.80±1.74[a]	7.33±1.53[a]	6.87±1.12[a]
Moisture	6.57±1.52[ab]	5.83±1.95[b]	6.47±1.48[ab]	6.47±1.59[ab]	7.30±1.32[a]
Sweetness [ns]	6.77±1.55	6.37±1.73	6.83±1.58	6.33±1.45	6.63±1.61
Flavor [ns]	6.13±1.74	6.47±1.61	6.07±1.62	6.67±1.49	6.83±1.26
Overall liking	7.13±1.04[a]	5.97±1.90[c]	6.20±1.35[bc]	6.87±1.54[ab]	7.13±1.04[a]

[a-c] Different letters within the same row indicates significantly different ($p \leq 0.05$)
[ns] Means within the same row indicates not significantly different ($p>0.05$)

ผลจากการทดแทนแป้งเค้กด้วยแป้งมันม่วง

จาก Table 6 พบว่า ผู้ทดสอบมีความชอบด้านลักษณะทางประสาทสัมผัสต่อเค้กสปันจ์สูตรทดแทนด้วยแป้งมันม่วงทั้ง 3 สูตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (*p*>0.05) โดยมีความชอบโดยรวมของเค้กสปันจ์สูตรทดแทนด้วยแป้งมันม่วง 25% ได้คะแนนมากที่สุดคือ 6.77 และให้พลังงานอยู่ที่ 158.3 2กิโลแคลอรี่/55กรัม แต่ทางผู้วิจัยได้เลือกสูตรที่ทดแทนด้วยแป้งมันม่วง 50% ไปพัฒนาต่อเนื่องจากได้คะแนนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (*p*>0.05) กับสูตรทดแทนด้วยแป้งมันม่วง 25% คือ 6.67 อีกทั้งยังให้พลังงานน้อยกว่าสูตรทดแทนด้วยแป้งมันม่วงร้อยละ 25 คือให้พลังงานอยู่ที่ 150.32 กิโลแคลอรี่/55กรัม และมีราคาต้นทุนต่ำกว่าสูตรที่ทดแทนด้วยแป้งมันม่วงร้อยละ 75 และจากผลการทดสอบความพอดีแบบ 3-point Just about right ดัง Table 7 จะเห็นได้ว่าสูตรที่ทดแทนด้วยแป้งมันม่วง 50% ต้องปรับความนุ่มฟูให้มากขึ้นดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการปรับเพิ่มปริมาณผงฟูจากร้อยละ 0.93 เป็นร้อยละ 1 ซึ่งตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 389) พ.ศ.2561 ผงฟูสามารถปรับได้ตามปริมาณที่เหมาะสม และทำการตัดการใช้นมในสูตรออกเนื่องจากนมมีผลต่อความชุ่มฉ่ำของเค้กสปันจ์ (จันทร์เฉิดฉาย, 2559) ซึ่งส่งผลให้เค้กที่ได้มีความสูงหลังอบที่สม่ำเสมอและสูงมากขึ้นถึง 4.5 เซนติเมตรและนุ่มฟูขึ้นกว่าเดิมดัง Figure 6 ซึ่งสูงกว่าสูตรเดิมอย่างเห็นได้ชัดเจน (Figure 5) และจากการปรับความนุ่มฟูโดยการตัดนมออกในครั้งนี้ส่งผลให้พลังงานของเค้กสูตรนี้ จาก 150.32 กิโลแคลอรี่/55กรัม เหลือเพียง 135.57 กิโลแคลอรี่/55กรัม และจากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธีการให้คะแนนความชอบ 9-point hedonic scale พบว่าสูตรเค้กสปันจ์ที่ปรับความนุ่มฟูแล้วนี้ได้คะแนนความชอบอยู่ที่ 6.8 คะแนนและได้คะแนนด้านความนุ่มฟูอยู่ที่ 6.67 คะแนนมากกว่าสูตรเดิมเมื่อทดสอบเปรียบเทียบกัน ซึ่งได้เพียง 6.20 คะแนน

ดัง Table 8 ซึ่งจากการทดสอบความพอดี 3-point Just about right พบว่าได้รับคะแนนคุณลักษณะทุกด้านเกินร้อยละ 70 จึงไม่ต้องปรับความพอดีในด้านใดอีก และจากการวัดค่าทางเคมีเพื่อศึกษา Proximate Analysis พบว่าเค้กสปันจ์สูตรสุดท้ายนี้มีค่าความชื้น ร้อยละ 34.38 โปรตีน ร้อยละ 7.94 เส้นใยหยาบ ร้อยละ 2 ไขมันร้อยละ 23.06 เถ้า ร้อยละ 1.32 และคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 68.7

Figure 5 substituted with purple sweet potato flour for 50% sponge cake.

Figure 6 Reducing milk and adding baking powder sponge cake.

Table 6 Liking scores of sponge cake with different levels of purple sweet potato flour.

	TRT1 (0%)	TRT2 (25%)	TRT3 (50%)	TRT4 (75%)
Color	7.47±1.50^{a}	4.40±2.16^{c}	6.23±1.55^{b}	5.83±2.26^{b}
Texture	7.30±1.06^{a}	7.07±1.26^{ab}	6.47±1.31^{b}	6.37±1.79^{b}
Moisture ^{ns}	7.07±1.28	7.13±1.22	6.60±1.25	6.50±1.72
Sweetness ^{ns}	7.13±1.41	7.20±1.03	6.93±1.17	6.57±1.57
Purple sweet potato Flavor	7.67±0.95^{a}	6.20±1.49^{b}	6.67±1.49^{ab}	6.63±1.99^{ab}
Overall liking	7.43±1.07^{a}	6.77±1.76^{ab}	6.67±1.37^{b}	6.50±1.22^{b}

$^{a-b}$ Different letters within the same row indicates significantly different ($p \leq 0.05$)

^{ns} Means within the same row indicates not significantly different ($p > 0.05$)

Table 7 Just about right scores of sponge cake substituted with 50% purple sweet potato flour .

TRT		Frequency			%			Net Score	
		NE	JAR	TM	NE	JAR	TM		
TRT3 (50%)	Color	3	19	8	10.00	63.33	26.67	16.67	No
	Texture	10	20	0	33.33	66.67	0.00	-33.33	Yes
	Moisture	5	24	1	16.67	80.00	3.33	-13.33	No
	Sweetness	1	24	5	3.33	80.00	16.67	13.33	No
	Purple sweet potato Flavor	8	17	5	26.67	56.67	16.67	-10.00	No

NE, JAR, TM are not enough, just about right and too much of just about right test, respectively

The word (No) in the right column indicates the result that does not have to adjust in that attribute

Table 8 Liking scores of sponge cake that reduced milk and added baking powder formula.

	Control of substituted with purple sweet potato flour 50 %	Developed texture formula
Color ^{ns}	6.13±1.36	6.37±1.27
Texture	6.20±1.19^{b}	6.67±1.45^{a}
Moisture ^{ns}	6.53±1.22	6.73±1.36
Sweetness ^{ns}	6.80±1.24	6.60±1.38
Purple sweet potato Flavor ^{ns}	6.50±1.36	6.43±1.25
Overall liking ^{ns}	6.73±1.31	6.80±1.30

$^{a-b}$ Different letters within the same row indicates significantly different ($p \leq 0.05$)

^{ns} Means within the same row indicates not significantly different ($p > 0.05$)

สรุป

จากการศึกษาสัดส่วนการใช้อินูลินและแป้งมันม่วงเพื่อลดพลังงานในเค้กสปันจ์พบว่าสูตรที่เหมาะสมมีปริมาณแป้งเค้กร้อยละ 9.33 กล่าวคือแป้งมันม่วงสามารถทดแทนแป้งเค้กได้มากถึงร้อยละ 50 และมีปริมาณน้ำมันในสูตรร้อยละ 8.95 จากเดิม 14.92 กล่าวคือสามารถใช้อินูลินทดแทนน้ำมันไปได้ถึงร้อยละ 40 ซึ่งสูตรที่เหมาะสมนี้ได้คะแนนความชอบโดยรวมจากการประเมินความชอบแบบ -9point hedonic scale ที่ 6.8 คะแนน (ความชอบระดับเล็กน้อยถึงปานกลาง) ซึ่งคะแนนใกล้เคียงกับสูตรพื้นฐานแรกที่ได้ 7.2 คะแนน และไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (P>0.05) งานวิจัยต่อเนื่องควรมีการปรับลดในด้านของปริมาณน้ำมันในสูตรเพิ่มเติมเพื่อลดพลังงานให้มากขึ้น ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดสำหรับผลิตภัณฑ์กลุ่มเบเกอรี่ชนิดอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และบริษัท ดีเคเอสเอช (ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

จันทร์เฉิดฉาย สังเกตกิจ, ประทีป ตุ้มทอง, ณิชาภา สารธิยากุล, จักรินทร์ สนุกแสน และอัญชนา อุดมเทวี . .2559. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังและเค้กปราศจากกลูเตนและไขมันทรานส์จากแป้งข้าวหอมมะลิ.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

ณรงค์ แดงเปี่ยม. 2558 .**วิจัยและพัฒนาการผลิตมันเทศ.** กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

นันท์ยง เฟื่องขจรฟูง. 2561. **ผลของการใช้เนื้อมันเทศสีม่วงทดแทนแป้งสาลีต่อคุณลักษณะมัฟฟิ่น.** มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, กรุงเทพฯ.

นิพัทธา พันธ์พานิช, ภัครพี กันทะมา และ ศุภกิตต์ โรจนาธีรวัฒน์. ม.ป.ป. **การแปรรูปแป้งทาร์ตสำเร็จรูปจากมันเทศสีม่วง.** คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ศิริพร ตันจอ, ครรชิต จุดประสงค์, ชนัญฑิตา ไชยโต และสนั่น จอกลอย .2555 .**การศึกษาอินนูลินและฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรค์ในแก่นตะวันสายพันธุ์ต่าง ๆ.** ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข. 2541. “**ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ.2541 เรื่อง ฉลากโภชนาการ**”. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 115 ตอนพิเศษ 47ง กรุงเทพฯ

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข. 2561. “**ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 389) พ.ศ.2561 เรื่อง วัตถุเจือปนอาหาร**”. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 135 ตอนพิเศษ 178ง กรุงเทพฯ

Bakeryclick. 2556. **สปันจ์เค้ก (Sponge Cake)** (Online). http://ibakedhomemadebakery.blogspot.com/2013/10/sponge-cake.html, July 1,2019

International Food Information Council Foundation. 2019. **2019 Food and Health Survey** (Online). https://foodinsight.org/wp-content/uploads/2019/05/IFIC-Foundation-2019-Food-and-Health-Report-FINAL.pdf, July 5, 2019.

Potatoes USA. 2019. **Potato Nutrition** (Online). https://www.potatogoodness.com/nutrition/, July 1, 2019

Seo M.J., J.E. Park and M.S. Jang. 2010. Optimization of sponge cake added with turmeric powder using mixture design. **Food Science and biotechnology**. 19(3):617-625.

ศักยภาพของเปลือกกล้วยในการผลิตสารสีและสารลดคอเลสเตอรอลด้วยวิธีหมักแบบอาหารแข็ง

A Potentiality of Banana Peel on Cholesterol-Lowering Agent and Pigments Production Under Solid State Fermentation

ลลิตา คชารัตน์[1,2] ประภัสสร รักถาวร[2*] วราภา มหากาญจนกุล[1] อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ [2]และ เกสรี กลิ่นสุคนธ์[2]

Lalita Khacharat[1,2], Prapassorn Rugthaworn[2*], Warapa Mahakarnchnakul[1], Udomlak Sukatta[2] and Ketsaree Klinsukhon[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดในเปลือกกล้วย และใช้เป็นซับสเตรตในการเพาะเลี้ยงเชื้อราโมแนสคัส เพื่อผลิตสารสีและสารโลวาสแตตินที่ปลอดภัยจากสารพิษซิตรินิน จากการวิเคราะห์ปริมาณสาร ฟีนอลิกทั้งหมดและสารฟลาโวนอยด์ในเปลือกกล้วย 2 ชนิด ได้แก่ กล้วยน้ำว้า และกล้วยหอมทอง และระยะการสุก 2 ระดับ ได้แก่ ดิบ และสุก พบว่า เปลือกกล้วยหอมทองดิบมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารฟลาโวนอยด์สูงสุด จากการศึกษาปัจจัยในกระบวนการหมักแบบแข็งด้วยเชื้อรา *Monascus purpureus* ที่ส่งผลต่อการผลิตสารโลวาสแตติน สารสี และสารพิษซิตรินินซึ่งประกอบด้วยระยะเวลาในการบ่มและระยะสุกของเปลือกกล้วยหอมทอง พบว่า การใช้เปลือกกล้วยหอมทองสุกเป็นซับสเตรต และทำการบ่มเป็นระยะเวลา 32 วัน สามารถผลิตสารโลวาสแตตินได้สูงสุด เท่ากับ 861.91 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และตรวจไม่พบสารซิตรินิน ในขณะที่การผลิตสารสีสูงสุดที่ค่าความเข้มสีที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร เท่ากับ 414.67 Unit/ g DW และที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร เท่ากับ 319.81 Unit/ g DW ได้จากการหมักเปลือกกล้วยหอมทองดิบด้วยกระบวนการหมักแบบแข็ง เป็นระยะเวลา 28 วัน จากการทดลอง พบว่า เปลือกกล้วยหอมทองสามารถใช้เป็นซับสเตรตในการหมักเชื้อรา *M. purpureus* เพื่อผลิตสี และสารโลวาสแตตินเพื่อนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารต่อไป

ABSTRACT

The aim of this study was to determine total phenolics and flavonoids content from banana peels and to use it as substrate for lovastatin and pigments production with minimum citrinin content. As a result of determination of total phenolics and flavonoids content in 2 varieties: Kluai Nam Wa) NW) and Kluai Hom Thong (HT) banana peel and 2 stages of harvest: mature green and overripe showed that mature green HT banana peel contained the highest content of total phenolics and flavonoids. In this study, solid state fermentation (SSF) factors including incubation time and ripeness stages of HT banana peel on lovastatin ,pigments and citrinin production by *Monascus purpureus* were investigated. The result showed that using overripe HT banana peel as a fermentation substrate under incubation for 32 days presented the highest lovastatin content of 861.91 µg/g and citrinin was not found. The maximum yields of pigments at OD_{500} and OD_{440} produced from 28 days SSF of mature green HT banana peel by *M. purpureus* were 414.67 and 319.81 Unit/ g DW, respectively. HT banana peel can be used as substrate for the production of lovastatin and pigments by *M. purpureus* under SSF. Lovastatin and pigments can be used as active ingredient in food products.

Key words: Banana peel, *Monascus*, Pigments, Lovastatin

* Corresponding author; e-mail address: aappsr@ku.ac.th

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

กล้วยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทยที่มีการจำหน่ายทั้งแบบผลสดและแปรรูป ซึ่งในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากกล้วยนั้นทำให้เกิดเปลือกกล้วยเหลือทิ้งที่ส่งผลให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อม แม้มีการนำเปลือกกล้วยมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การผลิตเส้นใย การผลิตปุ๋ย เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกกล้วยและลดปริมาณขยะลง แต่ยังคงมีเปลือกกล้วยเหลือทิ้งอีกจำนวนมาก ทั้งที่เปลือกกล้วยเป็นแหล่งของเยื่อใยและคาร์โบไฮเดรตที่ดี จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นแหล่งอาหารของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง ตัวอย่างเช่น เชื้อราโมแนสคัส *(Monascus sp.)* เป็นเชื้อราที่ให้สีในอาหาร เช่น ข้าวแดง เต้าหู้ยี้ ไวน์ และไส้กรอก เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นยาพื้นบ้านโดยเฉพาะในแถบเอเชียใต้ ข้าวแดง (red yeast rice) ผลิตจากเชื้อราโมแนสคัส เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริมสุขภาพมีถิ่นกำเนิดในประเทศจีนมามากกว่า 1,000 ปี (Lee และคณะ, 2006; Ma และคณะ, 2000) และเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายทั่วโลก สีธรรมชาติจากเชื้อราโมแนสคัสจัดเป็นสารเมแทบอไลต์ประเภททุติยภูมิซึ่งไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับหน้าที่เมแทบอลิซึม (metabolism) ที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต ลักษณะประการหนึ่งของสารประกอบชนิดนี้ คือ การสร้างสารเกิดขึ้นหลังจากช่วงการเจริญหมดไปแล้ว แยกจากการเจริญของเซลล์ (Goswami และคณะ, 2013) เช่น สารโลวาสแตตินที่ถูกสร้างโดยเชื้อราโมแนสคัสถูกสร้างขึ้นในระยะจำนวนเซลล์สูงสุดและคงที่ ไม่มีการเพิ่มจำนวนแล้ว (stationary growth phase) (Patakova, 2013) สารสีที่สร้างจากเชื้อราโมแนสคัสสามารถใช้เป็นสีผสมอาหารแทนสีสังเคราะห์ทำให้ผู้บริโภคที่ตระหนักเรื่องการใช้สารสังเคราะห์รู้สึกมั่นใจและบริโภคอาหารได้อย่างสบายใจยิ่งขึ้น แต่ในกระบวนการผลิตข้าวแดงพบรายงานการปนเปื้อนสารพิษซิตรินิน (citrinin) ในอาหารเสริมและผลิตภัณฑ์จากเชื้อราโมแนสคัส ซึ่งเกินค่ากำหนดของ Food and Drug Administration (FDA) ที่กำหนดไว้ (Liao และคณะ, 2014) โดยประเทศไต้หวันกำหนดให้ผลิตภัณฑ์ข้าวแดงมีค่าไม่เกิน 5,000 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และในผลิตภัณฑ์จากเชื้อราโมแนสคัสไม่เกิน 2,000 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

สารพิษซิตรินินที่เกิดจากการผลิตของเชื้อรามีผลต่อตับและไตของมนุษย์ ซึ่งเมื่อรับประทานอาหารหรือวัตถุดิบทางการเกษตรที่ปนเปื้อนสารพิษซิตรินินนี้ในระยะยาวอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพได้ จึงมีการศึกษาเพื่อหาวิธีในการยับยั้งและทำลายสารพิษซิตรินินที่พบในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์อาหารที่ปลอดภัย การศึกษาเพื่อลดการผลิตสารพิษซิตรินินของเชื้อราโมแนสคัสมีทั้งการควบคุมสภาวะระหว่างกระบวนการผลิต การควบคุมความเป็นกรด-ด่าง (Orozco และ Kilikian, 2008) การใช้สารประกอบฟีนอลิก เช่น ยูจีนอล (eugenol) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในกานพลู เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของยูจีนอล เพื่อควบคุมการผลิตสารพิษซิตรินิน พบว่า ยูจีนอลที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดการผลิตสารพิษซิตรินินของเชื้อรา *Penicillium citrinum* ได้ และยูจีนอลที่ความเข้มข้น 200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ทำให้เชื้อรา *P. citrinum* ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ปกติ มีช่วง lag phase ที่ยาวและเริ่มเจริญได้หลังจากวันที่ 9 (Vazquez และคณะ, 2001) นอกจากนี้ Mossini และ Kemmelmeier (2008) ยังทำการทดสอบการยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อรา P. citrinum โดยการเพาะเชื้อราลงบนอาหาร Potato Dextrose Agar (PDA) ที่ผสมสารสกัดจากใบสะเดา 12.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ผสมสารสกัด พบว่าขนาดของโคโลนีในอาหาร PDA ผสมสารสกัดใบสะเดามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าในชุดควบคุมสารประกอบฟีนอลิกหลักในใบสะเดาตรวจพบ 2 ชนิด คือ กรดแกลลิค (gallic acid) และกรดเฟอรูลิก (ferulic acid) (Singh และคณะ, 2005) การวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะเปลี่ยนวัสดุในการหมัก โดยการใช้เปลือกกล้วยที่เหลือจากกระบวนการแปรรูปซึ่งมี

สารประกอบฟีนอลิก มาใช้กับกระบวนการหมักแทนข้าว เพื่อให้มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ ในขณะที่เชื้อราสามารถเจริญได้ดี และปลอดภัยจากสารพิษซิตรินินด้วย (Mossini และ Kemmelmeier, 2008)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. **การวิเคราะห์สารพฤกษเคมีในเปลือกกล้วย**

1.1 การเตรียมตัวอย่างเปลือกกล้วย เปลือกกล้วยน้ำว้าได้รับ จากบริษัท จิราพรฟู๊ด จำกัด และเปลือกกล้วยหอมทองได้รับ จากบริษัท คิง ฟรุทส์ จำกัด โดยใช้เปลือกกล้วยดิบสีเขียว และเปลือกกล้วยสุกสีเหลือง ล้างทำความสะอาด หั่นเป็นชิ้นขนาด 1X1 เซนติเมตร นำมาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง ให้เปลือกกล้วยมีความชื้นประมาณ 10-13 %

1.2 การสกัดสารจากเปลือกกล้วย ทำการสกัดด้วยเอทานอลความเข้มข้น 70% ในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 ทำการสกัดในอ่าง ultrasonic bath ที่ระดับความถี่ 37 กิโลเฮิร์ทซ์ (KHz) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที ทำการสกัดซ้ำ 3 ครั้ง แล้วปรับปริมาตรให้เป็นอัตราส่วน 1 ต่อ 10

1.3 วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ทำการวิเคราะห์โดยดัดแปลงจากวิธี Folin-ciocalteu colorimetric method ตามวิธีของ Wolfe *et al.* (2003) นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิค โดยแสดงผลเป็นค่ามิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิคในสารสกัดหนัก 1 กรัม (mg GAE/ g dry sample)

1.4 วิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ ทำการวิเคราะห์ตามวิธีของ Wolfe *et al.* (2003) นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของแคททิคินคำนวณค่าเป็นมิลลิกรัมสมมูลของสารแคททิคินในสารสกัดหนัก 1 กรัม (mg CE/ g dry sample)

2. **วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยหอมทอง**

วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกกล้วยดิบและสุก ได้แก่ ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยง่าย (Nitrogen free extract) ปริมาณโปรตีนรวม (Crude protein) ปริมาณไขมัน (Ether extract) ปริมาณเยื่อใยอาหารหยาบ (Crude fiber) ปริมาณเถ้า (Ash) ปริมาณความชื้น (Moisture content) ตามวิธีของ AOAC (2000)

3. **การศึกษาปัจจัยในการเลี้ยงเชื้อราโมแนสคัส**

ปัจจัยในการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *Monascus purpureus* TISTR 3003

- ศึกษาระยะการสุกของเปลือกกล้วยในการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *Monascus purpureus* 2 ระดับ เปลือกกล้วยหอมทองดิบ และเปลือกกล้วยหอมทองสุก
- ศึกษาระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง แบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 24, 28, 32 และ 36 วัน

นำเปลือกกล้วยอบแห้งบรรจุลงในถุงพลาสติกทนร้อนขนาด 8x12 ตารางนิ้ว ปริมาณ 20 กรัม นำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำ จากนั้นเตรียมหัวเชื้อเริ่มต้นในลักษณะสารแขวนลอยสปอร์ โดยใช้สารแขวนลอยสปอร์ 5 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร ปรับให้มีปริมาณความชื้นเริ่มต้น 55 % (%,w/w)

3.1 วัดค่าสี

สกัดสารสี ตามวิธีการของ Huang *et al. (2017)* โดยการนำเปลือกกล้วยหมักปริมาณ 1 กรัม สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล 70 % ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปสกัดบนเครื่องเขย่า ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง what man เบอร์ 1 นำไปวิเคราะห์ค่าสี

- วัดค่าความเข้มสี *(*Pigment intensity) ที่ความยาวคลื่น 500 และ 440 นาโนเมตร

$$\text{Pigment intensity (Unit/ g DW)} = A_{OD} \times \textit{Dilution} \times \textit{Volume of extract}$$

- วัดค่าสีด้วย ระบบ CIE L*a*b* (CIE LAB) และ CIE L*C*h

3.2 วิเคราะห์ปริมาณสารโลวาสแตติน

สกัดสารโลวาสแตติน (Lovastatin) โดยการนำเปลือกกล้วยหมักปริมาณ 1 กรัม สกัดด้วยเอทานอล 70 % ปริมาตร 20 มิลลิลิตร วิเคราะห์ปริมาณสารโลวาสแตติน ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยดัดแปลงวิธีจาก Panda *et al. (*2010)

3.3 วิเคราะห์ปริมาณสารพิษซิตรินิน

สกัดสารพิษซิตรินิน (Citrinin) โดยการนำตัวอย่างปริมาณ 1 กรัม สกัดด้วยเอทานอล 70 % ปริมาตร 30 มิลลิลิตร วิเคราะห์ปริมาณสารพิษซิตรินิน ด้วยเครื่อง HPLC โดยดัดแปลงวิธีจาก Pattanagul *et al.* (2008)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การวิเคราะห์สารพฤกษเคมีที่สำคัญในเปลือกกล้วย

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารฟลาโวนอยด์ในเปลือกกล้วย 2 ชนิด ได้แก่ เปลือกกล้วยน้ำว้าและหอมทอง ระยะการสุก 2 ระดับ ได้แก่ ดิบและสุก พบว่า เปลือกกล้วยหอมทองดิบมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารฟลาโวนอยด์ สูงกว่าเปลือกกล้วยหอมทองสุกและเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบและสุก โดยมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 59.74, 31.14, 3.49, 3.33 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิคต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ปริมาณสารฟลาโวนอยด์เท่ากับ 27.59, 6.29, 3.39 และ 3.12 มิลลิกรัมสมมูลของแคททิคินต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับแสดงดัง Table 1 เปลือกกล้วยถูกนำมาศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การผลิตแป้งจากเปลือกกล้วยหอม พบว่าแป้งจากเปลือกกล้วยหอมมีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 29 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิคต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Rebello และคณะ, 2014) เปลือกกล้วย *Musa paradisiaca* L. ที่ผ่านการสกัดด้วยเอทานอล 80 % มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารฟลาโวนอยด์ เท่ากับ 15.21 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิคต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และ 18.52 มิลลิกรัมสมมูลของเควอซิทินต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Gaafar, 2016) ซึ่งจากการวิเคราะห์เปลือกกล้วยทั้ง 2 ชนิด พบว่าเปลือกกล้วยหอมทองมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารฟลาโวนอยด์สูงกว่าเปลือกกล้วยน้ำว้า เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Noysang *et al.*, (2019) จึงเลือกเปลือกกล้วยหอมทองเพื่อทำการศึกษาต่อไป

Table 1 The bioactive compound content of banana peel at different species and harvest period.

Harvesting period / Species	Total phenolic content (mg GAE/1 g crude extract)	Flavonoid content (mg CE/ g crude extract)
Mature green Kluai Nam Wa	3.49 ± 0.04^{c}	3.39 ± 0.08^{c}
Overripe Kluai Nam Wa	3.33 ± 0.04^{c}	3.12 ± 0.04^{c}
Mature green Kluai Hom Thong	1.62 ± 59.74^{a}	27.59 ± 0.89^{a}
Overripe Kluai Hom Thong	1.42 ± 31.14^{b}	6.29± 0.08^{b}

$^{a-c}$ Means followed by the same letter in the column do not differ significantly from each other, by the Duncan test, at the 5% level of significance.

2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยหอมทอง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ด้วยวิธีการ Proximate Analysis (AOAC, 2000) ของเปลือกกล้วยหอมทองดิบและสุก ได้แก่ ปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า และความชื้น เพื่อประเมินความเหมาะสมสำหรับเป็นแหล่งอาหารต่อการเจริญและการผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเชื้อรา *M. purpures* พบว่า เปลือกกล้วยหอมทองดิบมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า และความชื้น 46.01, 8.45, 3.71, 19.45, 17.51 และ 4.87 % ตามลำดับ และเปลือกกล้วยหอมทองสุก 47.45, 7.97, 4.12, 15.49, 15.75 และ 9.22 % ตามลำดับ แสดงดัง Table 2 การหมักเชื้อราโมแนสคัสเพื่อผลิตสารสีและสารโลวาสแตติน ข้าวเป็นวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้เป็นซับสเตรตและได้รับความนิยมมากในแถบเอเชียซึ่ง Ibukun (2008) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในข้าวขาว พบว่า ข้าวขาวมีคาร์โบไฮเดรต 73.63-76.74 % โปรตีน 5.98-8.88 % ไขมัน 1.47-1.84 % เส้นใยหยาบ 1.02-1.76 % เถ้า 1.15-2.77 % และความชื้น 13.11-13.65 % องค์ประกอบทางเคมีของข้าวสีแดง มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต 53-60% โปรตีน 15-16 % ไขมัน 6-7% เถ้า 0.9-1 %และความชื้น 7-10 % (Rodríguez-Amaya, 2000) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาร์โบไฮเดรตระหว่างข้าวกับเปลือกกล้วยจะเห็นได้ว่า เปลือกกล้วยมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตประมาณ 46-48 % เปลือกกล้วยจึงมีความเป็นไปได้สำหรับเป็นแหล่งคาร์บอนให้แก่เชื้อราในการเจริญ

Table 2 Proximate analysis of nutritional contents in Hom Thong banana peels agro-waste.

Parameter	Concentration (%)					
	NFE*	Crude protein	Ether extract	Crude fiber	Ash	MC**
Mature green	46.01	8.45	3.71	19.45	17.51	4.87
Overripe	47.45	7.97	4.12	15.49	15.75	9.22

*Nitrogen free extract =NFE, **Moisture content = MC

3. **การศึกษาปัจจัยในการเลี้ยงเชื้อราโมแนสคัสต่อปริมาณสารสี โลวาสแตติน และซิตรินิน**

จากการศึกษาปัจจัยในการเพาะเลี้ยงเชื้อราต่อการผลิตสารสีแดงและสีส้ม พบว่า เปลือกกล้วยหอมทองดิบ ส่งเสริมการผลิตสารสีได้ดีกว่าเปลือกกล้วยหอมทองสุก และระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง 28 วัน ส่งเสริมการผลิตสารสีแดงและสีส้มได้ดี โดยมีค่าความเข้มสีจากการหมักด้วยเปลือกกล้วยหอมทองดิบและสุกหมักที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร 414.67 ± 9.77 และ 319.81 ± 0.62 Unit/ g DW ตามลำดับ ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร 327.36 ± 7.87และ 275.51 ± 5.30 Unit/ g DW ตามลำดับ แสดงดัง Table 3 ซึ่งสูงกว่าการใช้ซังข้าวโพดเป็นซับสเตรต ดังการศึกษาของ Embaby *et al. (2018)* ใช้ ซังข้าวโพด ชานอ้อย และเปลือกมันฝรั่ง เป็นแหล่งคาร์บอน ในการผลิตสร้างสีส้มและแดงจากเชื้อราโมแนสคัส พบว่า ซังข้าวโพด เป็นซับสเตรตที่ดีที่สุดในการผลิต เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตโฟโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 500 และ 440 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 108.02 และ 133.77 Unit/mL สำหรับวัดค่าสีแดงและส้มตามลำดับ

Table 3 Pigment intensity of *Monascus* pigments by *Monascus purpureus* cultivated under different ripening stages of Hom Thong banana peels and incubation time in solid state fermentation.

Ripeness	Incubation time	Pigment intensity (Unit/ g DW)	
		OD_{500}	OD_{440}
Mature green	24 Days	348.20 ± 9.21^{b}	309.51 ± 8.07^{b}
	28 Days	414.67 ± 9.77^{a}	327.36 ± 7.87^{a}
	32 Days	340.95 ± 8.62^{b}	301.49 ± 0.87^{b}
	36 Days	302.05 ± 0.09^{d}	272.15 ± 1.42^{c}
Overripe	24 Days	312.89 ± 3.48^{c}	223.31 ± 14.56^{d}
	28 Days	319.81 ± 0.62^{c}	275.51 ± 5.30^{c}
	32 Days	300.15 ± 0.83^{d}	275.35 ± 4.98^{c}
	36 Days	276.27 ± 6.28^{e}	273.54 ± 1.99^{c}

[a-e] Means followed by the same letter in the column do not differ significantly from each other, by the Duncan test, at the 5% level of significance.

เมื่อพิจารณาค่าสีของสารสกัดจากเปลือกกล้วยหมักด้วยเชื้อราโมแนสคัส พบว่าสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมทองดิบ บ่มเป็นเวลา 28 วัน มีค่าความสว่าง (L*) ค่าสีเขียวและแดง (a*) ค่าสีน้ำเงินและเหลือง (b*) ความเข้มสี (C*) และมุมของสี (h^{o}) เท่ากับ 47.33 ± 0.46, 69.23 ± 0.41, 61.43 ± 0.50, 92.96 ± 0.35 และ 41.83 ± 0.40 องศา ตามลำดับ สารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมทองสุก บ่มเป็นเวลา 28 วัน มีค่าความสว่าง (L*) ค่าสีเขียวและแดง (a*) ค่าสีน้ำเงินและเหลือง (b*) ความเข้มสี (C*) และมุมของสี (ho) เท่ากับ 62.26 ± 0.47, 57.46 ± 0.55, 52.30 ± 0.45, 77.20 ± 1.04 และ 42.00 ± 0.98 องศา ตามลำดับ ดังแสดง Table 4

Table 4 Colorimetric values for the pigments produced by the *Monascus purpureus* cultivated under different ripening stages of Hom Thong banana peels and incubation time in solid state fermentation.

Ripeness	Incubation time	Color system				
		L*	a*	b*	C*	h^O
Mature green	24 Days	64.56 ± 1.05^b	56.30 ± 0.55^{de}	38.03 ± 0.90^f	67.96 ± 1.20^e	34.80 ± 0.86^d
	28 Days	47.33 ± 0.46^f	69.23 ± 0.41^a	61.43 ± 0.50^a	92.96 ± 0.35^a	41.83 ± 0.40^a
	32 Days	54.53 ± 0.56^e	65.46 ± 0.68^b	49.36 ± 0.77^d	82.03 ± 0.95^b	37.40 ± 0.60^c
	36 Days	57.36 ± 0.56^d	64.23 ± 0.80^{bc}	53.40 ± 0.60^b	83.43 ± 1.45^b	39.33 ± 0.83^b
Overripe	24 Days	65.70 ± 0.60^b	55.36 ± 1.19^e	46.20 ± 0.65^e	73.20 ± 0.81^d	40.40 ± 0.78^b
	28 Days	62.26 ± 0.47^c	57.46 ± 0.55^d	52.30 ± 0.45^{bc}	77.20 ± 1.04^c	42.00 ± 0.98^a
	32 Days	57.93 ± 1.10^d	63.46 ± 0.55^c	51.80 ± 0.85^c	82.16 ± 0.76^b	39.06 ± 0.97^b
	36 Days	80.70 ± 0.43^a	33.46 ± 0.68^f	24.43 ± 0.61^g	41.43 ± 0.50^f	35.73 ± 0.60^d

$^{a-g}$ Means followed by the same letter in the column do not differ significantly from each other, by the Duncan test, at the 5% level of significance.

เช่นเดียวกันกับการทดลองของ da Costa and Vendruscolo (2017) ทำการเลี้ยงเชื้อ *Monascus ruber* CCT 3802 ในอาหารแตกต่างกัน คือ กลูโคส แล็กโทส และ ไฮโดรไลซ์แล็กโทส ศึกษาค่าสี พบว่า ค่า L* เท่ากับ 31.91±0.03, 58.04±0.02 และ 37.97±0.02 ตามลำดับ ค่า a* เท่ากับ 59.82±0.02, 58.59±0.01 และ 66.96± 0.02 ตามลำดับ ค่า b* เท่ากับ 54.86±0.06, 71.10±0.08 และ 65.30±0.07 ตามลำดับ ค่า Chroma เท่ากับ 81.16, 92.12 และ 93.53 ตามลำดับ h^o เท่ากับ 42.52, 50.51 และ 44.28 องศา ตามลำดับ

นอกจากอาหารในการเพาะเลี้ยงค่าความเป็นกรด-เบส ก็ส่งผลต่อค่าสีด้วยเช่นการทดลองของ de Oliveira *et al*. (2019) ศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสต่อการเจริญและการผลิตสารสี ของเชื้อรา *Monascus ruber* พบว่า ที่ pH 2.0-2.5 สร้างสารสีเหลือง ค่า L* อยู่ในช่วง 65.10-71.11 ค่า a* อยู่ในช่วง 26.48-35.69 ค่า b* อยู่ในช่วง 110.06-115.80 ค่า C* อยู่ในช่วง 110.37-118.72 ค่า ho อยู่ในช่วง 71.13-77.11 องศา ที่ pH 3.0-3.5 สร้างสารสีส้ม ค่า L* อยู่ในช่วง 51.66-53.60 ค่า a* อยู่ในช่วง 44.73-50.57 ค่า b* อยู่ในช่วง 51.25-59.43 ค่า C* อยู่ในช่วง 74.38-82.02 ค่า h^o อยู่ในช่วง 45.38-42.34 องศา ที่ pH 4.0-7.0 สร้างสารสีแดง ค่า L* อยู่ในช่วง 38.83-48.29 ค่า a* อยู่ในช่วง 57.88-63.39 ค่า b* อยู่ในช่วง 46.28-57.78 ค่า C* อยู่ในช่วง 74.10-85.77 ค่า h^o อยู่ในช่วง 38.50-42.38 องศา

Table 5 Lovastatin and citrinin production by *Monascus purpureus* TISTR 3003 cultivated under different ripening stages of Hom Thong banana peels and incubation time in solid state fermentation.

Ripeness	Incubation time (Days)	Lovastatin (ug/g)	Citrinin (ng/g)
Mature green	24	201.34	nd
	28	378.59	nd
	32	467.98	nd
	36	412.64	21.20
Overripe	24	479.27	nd
	28	752.16	nd
	32	861.91	nd
	36	689.65	37.32

nd = Not detected

จากการศึกษาปัจจัยในการเพาะเลี้ยงเชื้อราต่อการผลิตสารโลวาสแตติน และสารพิษซิตรินิน พบว่า ระยะเวลาเพาะเลี้ยงเชื้อรา *M. purpureus* ที่ 32 วัน เชื้อราสามารถผลิตสารโลวาสแตตินสูงสุด โดยเปลือกกล้วยหอมทองสุก บ่มเป็นเวลา 32 วัน ส่งเสริมการผลิตสารโลวาสแตตินได้ดี (861.91 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) กว่าเปลือกกล้วยหอมทองดิบ บ่มเป็นเวลา 32 วัน (467.98 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) และการใช้เปลือกกล้วยทั้ง 2 ระยะในการหมักเชื้อรา *M. purpureus* วิเคราะห์ไม่พบสารพิษซิตรินิน ในช่วงเวลาการบ่มต่ำกว่า 36 วัน ดัง Table 5 ซึ่งจากงานวิจัยอื่น ๆ การผลิตสารโลวาสแตตินจากเชื้อรา *M. purpureus* ที่ใช้วัสดุอื่นเป็นซับสเตรตในการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *M. purpureus* จะพบว่ามีการปนเปื้อนของสารพิษซิตรินิน เช่น งานวิจัยของ Singgih *et al.* (2014) ศึกษาการสกัดสารโลวาสแตติน โดยใช้ข้าวเป็นสับเตรตในการหมักเชื้อรา เปรียบเทียบความเข้มข้นของเอทานอลที่ใช้ในการสกัด ได้แก่ 40, 50, 60, 70, 80 และ 95 % พบว่า เอทานอล 95 %สามารถสกัดสารโลวาสแตตินได้สูงที่สุดเท่ากับ 1,760.00 ไมโครกรัมต่อกรัม และทุกความเข้มข้นของเอทานอลสกัดสารพิษซิตรินินได้ไม่แตกต่างกัน Liang *et al.* (2018) ศึกษาการผลิตสารสีจากเชื้อราโมแนสคัสโดยใช้ข้าวเป็นซับสเตรตในการเพาะเลี้ยง บ่มเป็นเวลา 14 วัน ทำการสกัดสารสีโดยใช้เอทานอล 70 % สกัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารสกัดมาวิเคราะห์ปริมาณสารพิษซิตรินินด้วยเครื่อง HPLC วิเคราะห์พบสารพิษซิตรินิน เท่ากับ 49.17 ± 2.64 ไมโครกรัมต่อกรัม

สรุป

เปลือกกล้วยหอมทองมีสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการสร้างสารเมแทบอไลท์ทุติยภูมิของเชื้อรา เปลือกกล้วยหอมทองสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโตของเชื้อรา *M. perpureus* ได้ โดยเปลือกกล้วยหอมทองสามารถใช้เป็นซับสเตรตที่ดีในการผลิตสารสี โลวาสแตติน และลดการสร้างพิษซิตรินินของเชื้อรา *M. perpureus* ทั้งที่สารสำคัญในเปลือกกล้วยหอมทองควรมีการศึกษาต่อถึงผลการเจริญและการสร้างสารเมแทบอไลท์ทุติยภูมิของเชื้อราในลำดับต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร และได้รับการสนับสนุนเปลือกกล้วยจาก บริษัท คิง ฟรุทส์ จำกัด และ บริษัท จิราพร ฟู๊ด จำกัด

เอกสารอ้างอิง

AOAC. 2000. International association of official analytical communities. **Official Methods of Analysis of AOAC International 17th ed.**

Embaby, A.M., M.N. Hussein and A. Hussein. 2018 .*Monascus* orange and red pigments production by *Monascus purpureus* atcc16436 through co-solid state fermentation of corn cob and glycerol: An eco-friendly environmental low cost approach. **PloS One**. 13: e0207755.

Gaafar, A. 2016 .Identification of phenolic compounds from banana peel (*Musa paradaisica L.*) as antioxidant and antimicrobial agents. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**. 8: 45-55.

Goswami, S., A. Vidyarthi, B. Bhunia and T. Mandal. 2013 .A review on lovastatin and its production. **Journal of Biochemical technology**. 4 :581-587.

Huang, Q., H. Zhang และ D. Xue. 2017. Enhancement of antioxidant activity of radix puerariae and red yeast rice by mixed fermentation with *Monascus purpureus*. **Food Chemistry**. 226: 89-94.

Ibukun, E. 2008. Effect of prolonged parboiling duration on proximate composition of rice. **Scientific Research and Essays**. 3: 323-325.

Lee, C.-L., J.-J. Wang, S.-L. Kuo and T.-M. Pan. 2006. *Monascus* fermentation of dioscorea for increasing the production of cholesterol-lowering agent—monacolin k and antiinflammation agent—monascin. **Applied Microbiology and Biotechnology**. 72: 1254-1262.

Liang, B., X.-J. Du, P. Li, C.-C. Sun and S. Wang. 2018. Investigation of citrinin and pigment biosynthesis mechanisms in *Monascus purpureus* by transcriptomic analysis. **Frontiers in Microbiology**. 9: 1374.

Liao, C.-D., Y.-C. Chen, H.-Y. Lin, L.-C. Chiueh และ D.Y.-C. Shih. 2014. Incidence of citrinin in red yeast rice and various commercial *Monascus products* in taiwan from 2009 to 2012. **Food Control**. 38: 178-183.

Ma, J., Y. Li, Q. Ye, J. Li, Y. Hua, D. Ju, D. Zhang, R. Cooper and M. Chang. 2000. Constituents of red yeast rice, a traditional chinese food and medicine. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 48: 5220-5225.

Mossini, S.A.G. and C. Kemmelmeier. 2008. Inhibition of citrinin production in penicillium citrinum cultures by neem [azadirachta indica a. Juss (meliaceae)]. **International Journal of Molecular Sciences**. 9: 1676-1684.

Noysang, C., W. Buranasukhon and M. Khuanekkaphan. 2019. Phytochemicals and pharmacological activities from banana fruits of several *Musa* species for using as cosmetic raw materials. **Trans Tech Publications**. 30-40.

Orozco, S.F.B. and B.V. Kilikian. 2008. Effect of ph on citrinin and red pigments production by *Monascus purpureus* cct3802. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**. 24: 263-268.

Panda, B.P., S. Javed และ M. Ali. 2010. Optimization of fermentation parameters for higher lovastatin production in red mold rice through co-culture of *Monascus purpureus* and *Monascus ruber*. **Food and Bioprocess Technology**. 3: 373-378.

Patakova, P. 2013. *Monascus* secondary metabolites: Production and biological activity. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**. 40: 169-181.

Pattanagul, P., R. Pinthong, A. Phianmongkhol และ S. Tharatha. 2008. Mevinolin, citrinin and pigments of adlay angkak fermented by *Monascus sp*. **International Journal of Food Microbiology**. 126: 20-23.

Rebello, L.P.G., A.M. Ramos, P.B. Pertuzatti, M.T. Barcia, N. Castillo-Muñoz and I. Hermosín-Gutiérrez. 2014. Flour of banana (*Musa aaa*) peel as a source of antioxidant phenolic compounds. **Food Research International**. 55: 397-403.

Rodríguez-Amaya, D. 2000. Factors influencing carotenoid composition in foods. **The Hereld Organization Hamden, CT.** 258-263.

Singgih, M., V. Saraswaty, D. Ratnaningrum, S. Priatni and S. Damayanti. 2014. The influence of temperature and ethanol concentration in monacolin k extraction from *Monascus* fermented rice. **Procedia Chemistry**. 9: 242-247.

Vazquez, B.I., C. Fente, C. Franco, M. Vazquez and A. Cepeda. 2001. Inhibitory effects of eugenol and thymol on penicillium citrinum strains in culture media and cheese. **International Journal of Food Microbiology**. 67: 157-163.

Wolfe, K., X. Wu and R.H. Liu. 2003. Antioxidant activity of apple peels. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 51: 609-614.

คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ และยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส ของสารสกัดจากเปลือกเงาะเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง

Antioxidant and Tyrosinase Inhibition Properties of Extract from Rambutan Peels (*Nephelium lappaceum* L.) for Cosmetic Products

ทิพาพร ทองคำ[1] อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ[1] *ประภัสสร รักถาวร[1] เกสรี กลิ่นสุคนธ์[1] ลลิตา คชารัตน์[1] สุริสา สากยโรจน์[1]และ ณัฐภรณ์ เปรสันเทียะ[1]

Thipaporn Thongkum[1], Udomlak Sukatta*[1], Prapassorn Rugthaworn[1], ketsaree khinsukhon[1], Lalita Kacharat[1], Surisa Sakayaroj[1] and Natthaporn Presunthian[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสกัดสารกลุ่มเอลลาจิแทนนินจากเปลือกเงาะ โดยวิเคราะห์คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ ต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส และการยับยั้งการสร้างเมลานิน จากการศึกษาการสกัดทั้ง 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน ได้แก่ การสกัดด้วยซอกเลต (RP1) จากนั้นสกัดแยกส่วนด้วยเอทิลอะซิเตท (RP2) และต่อด้วยการแยกด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟี (RP3 (ผลการทดลองพบว่า RP2 และ RP3 พบสารกลุ่มเอลลาจิแทนนินปริมาณสูง โดย RP3 พบปริมาณสูงที่สุด ประกอบด้วย สารคอริลาจิน ในปริมาณ 108.92 mg/g สารเจอรานีน ในปริมาณ 248.65 mg/g และกรดเอลลาจิก 14.66 mg/g เมื่อทดสอบคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ ผลการทดลองพบว่า RP2 และ RP3 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้สูง ส่วนสารสกัด RP2 มีคุณสมบัติในการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสที่ทดสอบในหลอดทดลอง และยับยั้งการสร้างเมลานินได้ดีที่สุด โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 2.45 mg/ml และร้อยละการยับยั้งการสร้างเมลานิน เท่ากับ 5.26% ที่ความเข้มข้น 0.01 mg/ml ผลจากการทดลองทั้งหมดพบว่าสารสกัดจากเปลือกเงาะมีศักยภาพในการนำมาพัฒนาเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในเครื่องสำอาง

ABSTRACT

This research aimed to study the extraction of ellagictanin as bioactive compounds from rambutan peel. The extracts were evaluated for their antioxidant activities, anti-tyrosinase and inhibiting melanin activities. Extraction method consists of 3 steps, soxhlet extraction (RP1), partition with ethyl acetate (RP2) and isolation by column chromatography (RP3). The chemical components of RP2 and RP3 extracts showed high ellagitannins, especially RP3 extract had the highest content of ellagitannins, which consists of corilagin 108.92 mg/g, geraniin 248.65 mg/g and ellagic acid 14.66 mg/ml. The results showed that RP2 and RP3 extracts had extremely high antioxidant activities. In addition, RP2 had high tyrosinase inhibitory activities with IC_{50} 2.45 mg/ml and had high level inhibitory activity against melanin synthesis in B16F10 melanoma cells, 5.26% at concentration 0.01 mg/ml. The results from the experiment confirmed that rambutan peel extracts could be applied as bioactive ingredient in cosmetic products.

Key words: ellagitannins, rambutan peel, antioxidant activity, tyrosinase inhibition activity, bioactive ingredient

* Corresponding author; e-mail address: **aapuls@ku.ac.th**

[1]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากธรรมชาติ เป็นที่ต้องการอย่างสูงในตลาด เนื่องจากผู้บริโภคให้ความสำคัญเรื่องสุขภาพ จึงเกิดกระแสความนิยมและความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติเป็นจำนวนมาก สารกลุ่มเอลลาจิแทนนินเป็นสารฟีนอลิกที่พบในผลไม้ เช่น เงาะ ลำไย ทับทิม เป็นต้น มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระได้สูง ต้านการกลายพันธุ์ ต้านเชื้อจุลินทรีย์ ต้านการอักเสบ และต้านมะเร็ง ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไทโรซิเนสซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ใช้ในการสร้างเมลานินหรือเม็ดสีได้ดี (Mahmood *et al.*, 2018) ปัญหาของการสร้างเม็ดสีเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น พันธุกรรม ฮอร์โมน ความเครียด ส่งผลให้เกิดฝ้า และริ้วรอยบนผิวหน้า การใช้สารธรรมชาติมาช่วยแก้ปัญหา จึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน การสกัดสารกลุ่มเอลลาจิแทนนินส่วนใหญ่จะใช้วิธีการแยกด้วยคอลัมน์ระบบ reverse phase ซึ่งมีต้นทุนสูง งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการสกัดและแยกสารด้วยระบบ normal phase เพื่อจะลดต้นทุนในการผลิต จากข้อมูลเบื้องต้นแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำสารเอลลาจิแทนนินมาพัฒนาเป็นเครื่องสำอาง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสกัดสารกลุ่มเอลาจิแทนนินจากเปลือกเงาะ ซึ่งเป็นส่วนเหลือทิ้งจากการผลิต และการแปรรูปเงาะในประเทศไทย โดยทำการศึกษาวิธีการสกัดสารเอลลาจิแทนนิน ทดสอบคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ การยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส และการยับยั้งการสร้างเมลานิน เพื่อการนำมาพัฒนาเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในเครื่องสำอาง อีกทั้งส่งเสริมการใช้ประโยชน์สารเอลลาจิแทนนินในเชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกเงาะ

อุปกรณ์และวิธีการ

การสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะ

นำตัวอย่างเปลือกเงาะ ที่ได้จากบริษัท มาลีกรุ๊ป จำกัด มาล้าง หั่น และอบแห้ง และบดหยาบ ให้มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 10 จากนั้นสกัดร้อนแบบต่อเนื่องด้วยซอกเลต (soxhlet) ที่อุณหภูมิ 70-80 °C เป็นเวลา 32 h. ด้วยแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 และนำสารสกัดที่ได้ มาทำการระเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยแห้ง (Vacuum Rotary Evaporator; Buchi, Switzerland) ที่อุณหภูมิ 40°C ความดัน 150 bar จะได้สารสกัด RP1

การสกัดแยกสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะ

นำสารสกัด RP1 มาสกัดแยกส่วน (partition) ด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซิเตท) AR grade, Merck, Germany) ในอัตราส่วน 1:1 โดยใช้กรวยแยก (separating funnel) จากนั้นนำสารที่ละลายอยู่ในชั้นเอทิลอะซิเตท มาระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหย ได้สารสกัด RP2 (Moreira *et al.*, 2013)

การแยกสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟี

นำผงสารสกัด RP2 แยกผ่านคอลัมน์ โดยใช้ silica gel 60H (partical size <55 um) เป็นเฟสคงที่ และใช้ตัวทำละลาย dichloromethane:methanol)AR grade, Merck, Germany) ในอัตราส่วน 8:2 เป็นเฟสเคลื่อนที่ จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการแยกด้วยคอลัมน์ ระเหยตัวทำลายออกด้วยเครื่องระเหย จะได้สารสกัด RP3

การวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะโดยวิธีโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

วิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญในกลุ่มเอลลาจิแทนนินด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High-performance liquid chromatography; Shimadzu, Japan) ตามวิธีของ Thitilertdecha และ Rakariyatham (2011)โดยใช้ สารคอริลาจิน (corilagin) กรดเอลลาจิก (ellagic acid) กรดแกลลิก (gallic acid) และสารเจอรานีน (geraniin) เป็นสารมาตรฐาน โดยใช้คอลัมน์ Inertsil ODS-3 C18) 5 um, 4.6x150 mm) ตัวทำละลาย methanol และ 0.4% (v/v) formic acid (Merck, Germany)

การทดสอบกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะ

การตรวจสอบคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ 2, 2-Diphenyl--1 picrylhydrazyl (DPPH Radical Scavenging Capacity Assay) ตามวิธีของ Zhu *et al.* (2006)โดยวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer; Thermo Scientific GENESYS 10S, Germany) ที่ความยาวคลื่น 517 nm โดยใช้สาร BHT, alpha-tocopherol และ ascorbic acid เป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบ จากนั้นคำนวณหาค่า IC_{50}จากสมการเส้นตรง โดยที่ค่า IC_{50} คือความเข้มข้นของสารทดสอบที่ยับยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50

การตรวจสอบคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ABTS (ABTS radical cation: $ABTS^{\bullet+}$) ตามวิธีของ Re *et al.* (1999 (วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 nm ด้วยเครื่อง spectrophotometer โดยใช้สาร BHT, alpha-tocopherol และ ascorbic acid เป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบ จากนั้นคำนวณหาค่า IC_{50}

การทดสอบการต้านออกซิเดชัน Ferric reducing/antioxidant power (FRAP) assay ตามวิธีของ Kubola and Siriamornpun (2008) วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 595 nm ค่าการต้านออกซิเดชันคำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทดสอบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสาร Ferrous sulfate ($FeSO_4.7H_2O$) โดยรายงานเป็น µmol of Fe (II)/1g สารทดสอบ

การทดสอบการยับยั้ง superoxide anion radical ดัดแปลงวิธีทดลองจาก Kumar *et al.* (2008) วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 560 nm ใช้ ascorbic acid เป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบ จากนั้นคำนวณเพื่อหา IC_{50}

การทดสอบกิจกรรมการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะ

การทดสอบคุณสมบัติยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส)tyrosinase inhibition activity) โดยดัดแปลงวิธีจาก Kubo *et al.* (2000) และ Saewan *et al.* (2011) ด้วยวิธี deopachrome method วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วย spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 475 nm ใช้ kojic acid เป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบ จากนั้นคำนวณหาค่า IC_{50}

การทดสอบความสามารถในการยับยั้งการสร้างเมลานิน

ทดสอบตามวิธีของ Lajis *et al.* (2012) ทำการกระจายเซลล์เมลาโนมา (B16F10 cells) ลงในจานเพาะเลี้ยงเซลล์ และบ่มเซลล์ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 h. จากนั้นเติมสารตัวอย่างแล้วทำการบ่ม เป็นเวลา

48 h. และทำการดูดอาหารเลี้ยงเซลล์เก่าทิ้ง แล้วเติม 10% NaOH บ่ม ที่ 60 °C เป็นเวลา 1 h. จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 nm และคำนวณหาร้อยละของการยับยั้ง

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple-range test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม SPSS for windows (trial version)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการสกัด และการแยกสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะ

จากการศึกษาการสกัดสารออกฤทธ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะด้วยวิธีสกัดร้อนแบบต่อเนื่องด้วยซอกเลต (RP1) พบว่าได้สารสกัดผงสีน้ำตาลเข้ม มีร้อยละของผลผลิต เท่ากับ 33.71 เมื่อนำ RP1 มาสกัดแยกส่วนด้วยเอทิลอะซิเตท (RP2) และแยกสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะด้วยคอลัมน์โครมาโทรกราฟี (RP3) พบว่า RP2 และ RP3 มีร้อยละของผลผลิต เท่ากับ 11.34 และ 6.68 ตัวอย่างทั้งสองมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล

ปริมาณสารสำคัญจากเปลือกเงาะวิเคราะห์โดยวิธีโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC)

เอลลาจิแทนนิน เป็นสารสำคัญที่พบในสารสกัดเปลือกเงาะ โดยประกอบด้วยสารคอริลาจิน (corilagin) และเจอรานีน (geraniin) และกรดเอลลาจิก (ellagic acid) เป็นองค์ประกอบหลัก (Thitilertdecha *et al.*, 2011) นอกจากนี้ยังพบสารฟีนอลิก คือ กรดแกลลิก (gallic acid) เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ จากการวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญจากเปลือกเงาะที่ผ่านการสกัด การสกัดแยกส่วน และแยกสาร ทั้ง 3 ขั้นตอน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารสำคัญกลุ่มเอลลาจิแทนนิน พบว่า RP1, RP2 และ RP3 มีปริมาณสารเอลลาจิแทนนิน เท่ากับ 214.33, 340.51 และ 372.23 mg/g sample ตามลำดับ (Table 1) ตัวอย่าง RP2 และ RP3 (Figure 1) พบปริมาณสารเอลลาจิแทนนิน และกรดแกลลิกปริมาณสูง เนื่องจากการสกัดแยกส่วน และการแยกสารด้วยตัวทำละลายชนิดที่มีขั้วต่ำกว่าแอลกอฮอล์ ช่วยกำจัดสารกลุ่มที่ขั้วสูงออกไป ส่งผลให้ได้สารเอลลาจิแทนนินในปริมาณสูง (Palanisamy *et al.*, 2011)

Table 1 Quantification of main compounds of rambutan peel extract.

Main compound (mg/g sample)	RP1	RP2	RP3
ellagic acid	21.17 ± 1.19^{a}	16.90 ± 1.06^{b}	14.66 ± 1.04^{c}
corilagin	55.45 ± 4.32^{c}	81.54 ± 4.21^{b}	108.92 ± 3.84^{a}
geraniin	137.71 ± 11.18^{c}	242.07 ± 15.87^{b}	248.65 ± 8.08^{a}
total ellagitannin	214.33 ± 8.25^{c}	340.51 ± 15.64^{b}	372.23 ± 13.13^{a}
gallic acid	2.47 ± 0.02^{c}	8.86 ± 0.19^{b}	11.98 ± 0.05^{a}

Different letters (a, b, c) in the same row mean that the results are significantly different at $p < 0.05$ by Duncan's multiple-range test.

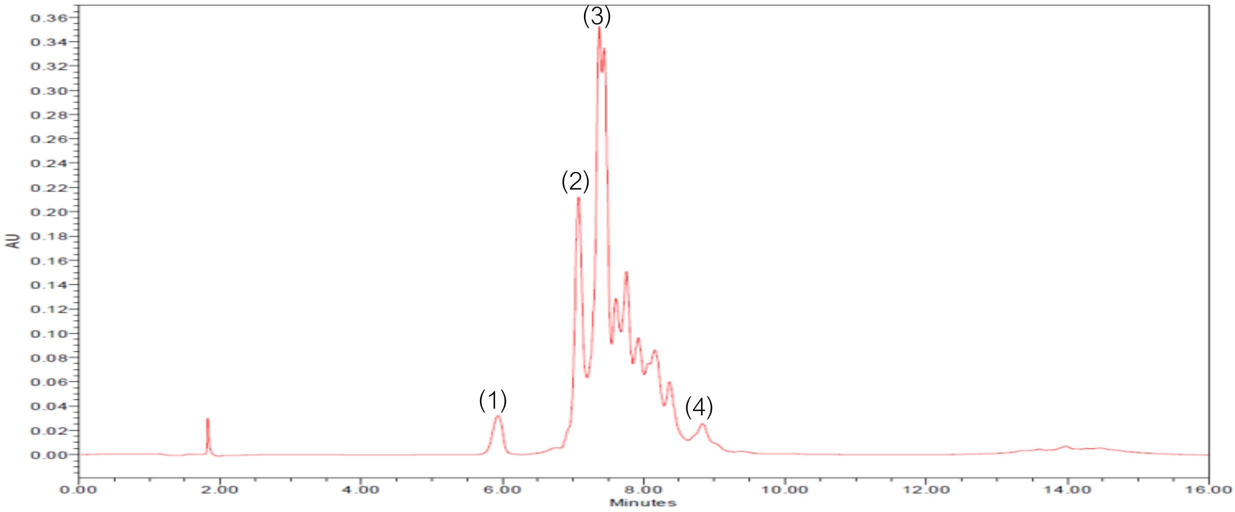


Figure 1 HPLC chromatogram of RP3. (1) gallic acid (t_R = 5.95 min), (2) geraniin (t_R = 7.07 min), (3) corilagin (t_R = 7.35 min) and (4) ellagic acid (t_R = 8.82 min).

กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะ

ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารออกฤทธิ์ชีวภาพจากเปลือกเงาะที่ผ่านการสกัด การสกัดแยกส่วน และแยกสาร ทั้ง 3 ตัวอย่าง เมื่อทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay, ABTS assay, โดยใช้ ascorbic acid, alpha tocopherol และ BHT เป็นสารมาตรฐาน ผลการทดลองพบว่า RP2 และ RP3 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ $DPPH^{\bullet}$ ได้เทียบเท่ากับสารมาตรฐาน ascorbic acid ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และสามารถต้านอนุมูลอิสระ $ABTS^{\bullet}+$ ได้ดีว่า ascorbic acid (Table 2) เช่นเดียวกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O2·-) ที่ตัวอย่างทั้ง 3 สามารถต้านอนุมูลอิสระซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O2·-) ได้ดีกว่า ascorbic acid เมื่อทำการทดสอบความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการให้อิเล็กตรอนอิสระ (reducing agent) สามารถใช้วัด total reducing power ของสารต้านอนุมูลอิสระได้และแสดงค่าการต้านอนุมูลอิสระเป็นค่า FRAP value โดยที่ค่าการให้อิเล็กตรอนอิสระ (FRAP value) สูงจะสามารถต้านอนุมูลอิสระดี ผลจากการทดสอบพบว่า RP1, RP2 และ RP3 มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอนอิสระได้ดีกว่า สาร BHT และ alpha tocopherol สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khonkarn *et al.*, (2010) ซึ่งพบว่าสารสกัดจากเปลือกเงาะด้วยตัวทำละลายที่มีขั้วสูงมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าสารมาตรฐาน BHT ทดสอบด้วยวิธี FRAP assay และ ABTS assay จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่า RP2 และ RP3 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้สูง เนื่องจากมีปริมาณสารกลุ่มเอลลาจิแทนนินเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก จากรายงานของ Palanisamy *et al.* (2011) ทำการทดสอบหาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ $ABTS^{\bullet}+$ ของสารสกัดจากเปลือกเงาะที่สกัดด้วยแอลกอฮอล์ ผลการทดลองพบว่าสารสกัดจากเปลือกเงาะ มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง จึงสรุปได้ว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเปลือกเงาะ เป็นผลมาจากปริมาณของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในกลุ่มเอลลาจิแทนนิน ที่มีความสามารถสูงในการต้านอนุมูลอิสระ เทียบเท่ากับ epigallocatechin gallate (EGCG) ที่พบได้ในใบชาเขียว (Tabata *et al.*, 2008)

Table 2 Free radical-scavenging activity of rambutan peel extract.

Samples	Free radical scavenging activities			
	DPPH assay IC_{50} (µg/ml)	ABTS assay IC_{50} (µg/ml)	Superoxide assay IC_{50} (µg/ml)	FRAP value (µmolFe(II)/gsample)
RP1	8.41±0.10^{ab}	308.41±19.84^{c}	27.68±1.84^{b}	6,656.67±283.26^{d}
RP2	5.29±0.19^{a}	204.43±2.37^{a}	17.95±1.64^{a}	9,598.67±347.72^{c}
RP3	4.86±0.02^{a}	215.43±2.76^{a}	19.72±1.98^{a}	10,420.21±258.70^{b}
ascorbic acid	4.02±0.14^{a}	281.36±1.35^{b}	100.02±5.20^{c}	14,037.19±69.33^{a}
alpha-tocopherol	11.70±1.95^{d}	560.49±4.94^{e}	-	4,198.73±94.69^{e}
BHT	131.78±5.68^{e}	460.88±14.21^{d}	-	2,403.02±61.25^{f}

Different letters (a, b, c, d) in the same column mean that the results are significantly different at $p < 0.05$ by Duncan's multiple-range test.

คุณสมบัติในการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสในหลอดทดลองของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเปลือกเงาะ

สารออกฤทธิ์ชีวภาพจากเปลือกเงาะที่ผ่านการสกัด การสกัดแยกส่วน และแยกสาร ทั้ง 3 ขั้นตอน เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสในในหลอดทดลองด้วยวิธี deopachrome method เป็นการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไทโรซิเนส โดยเปลี่ยนสารตั้งต้น L-DOPA เป็นรงควัตถุเม็ดสี pheomelanin และ eumelanin ใช้ kojic acid เป็นสารมาตรฐาน รายงานผลเป็นค่า IC_{50} ผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างทั้งสามมีความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) โดย RP1 RP2 และ RP3 มีค่า IC_{50} เท่ากับ 3.06, 2.45 และ 4.28 mg/ml ตามลำดับ (Figure 2A)

คุณสมบัติในการยับยั้งการสร้างเมลานินในเซลล์เมลาโนไซท์

จากการทดสอบตัวอย่างทั้ง 3 ในการยับยั้งการสร้างเม็ดสีเมลานินในเซลล์เมลาโนไซท์ ทำการทดสอบที่ความเข้มข้น 0.01 mg/ml เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่ไม่เป็นพิษต่อเซลล์เมลาโนมา (B16F10 cells) ผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างทั้งสาม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) โดย RP1, RP2 และ RP3 มีร้อยละของการยับยั้งการสร้างเมลานิน เท่ากับ 4.72, 5.26 และ 3.82 % ตามลำดับ (Figure 2B) โดย RP2 สามารถยับยั้งการสร้างเมลานินได้ดีที่สุด สอดคล้องกับผลการทดสอบการต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส เนื่องจากเปลือกเงาะมีองค์ประกอบของสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ กรดไฮดรอกซินนามิก เป็นต้น (Hernandaz *et al*., 2017) ซึ่งสารกลุ่มนี้มีความสามารถในการต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส และยับยั้งการสร้างเมลานิน (Panzella and Napolitano, 2019) ผลการทดลองการต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส และยับยั้งการสร้างเมลานินจึงไม่สอดคล้องกับปริมาณของสารกลุ่มเอลลาจิแทนนิน

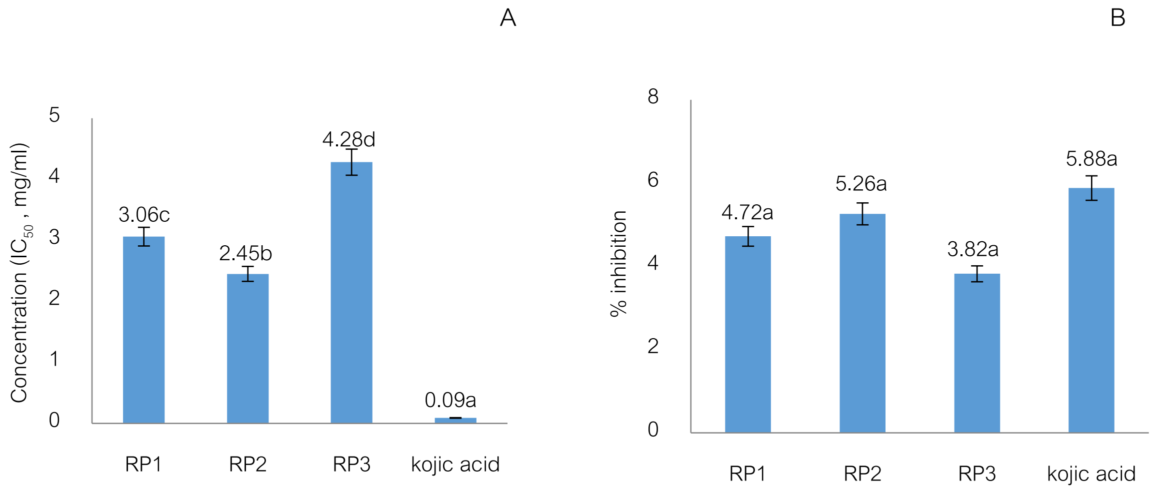


Figure 2 Tyrosinase inhibition activity (A) and melanin inhition in B16F10 melanoma cells of rambutan peel extract (B). Different letters (a, b, c, d) mean that the results are significantly different at $p < 0.05$ by Duncan's multiple-range test.

สรุป

การสกัด การสกัดแยกส่วน และการแยกสาร ทั้ง 3 ขั้นตอน มีผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในเปลือกเงาะ เมื่อวิเคราะห์สารกลุ่มเอลลาจิแทนนิน และกรดแกลลิก พบว่า RP2 และ RP3 มีปริมาณสารสำคัญสูง ส่งผลให้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง ส่วนคุณสมบัติในการต้านเอนไซม์ไทรโรซิเนส และยับยั้งการสร้างเมลานิน พบว่า RP2 มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ซึ่งผลการทดลองไม่สอดคล้องกับปริมาณสารกลุ่มเอลลาจิแทนนิน เนื่องจากมีสารออกฤทธิ์กลุ่มอื่นที่มีในเปลือกเงาะ เช่น flavone และ anthocyanin ที่มีคุณสมบัติการต้านเอนไซม์ไทรโรซิเนสได้ดีกว่า ดังนั้นสารสกัดจากเปลือกเงาะทั้ง RP2 และ RP3 จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการนำสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมาพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง จากผลการศึกษาข้างต้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนา ขยายขนาดในการผลิตสารออกฤทธิ์เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ในอนาคตได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Hernandez, C., J.S. Valdes, H.D.L. Garza, J.W. Paz, C.N. Aguilar, G.C.M. Avila, C.C. Lopez and A.A. Carbo. 2017. Polyphenolic content, in vitro antioxidant activity and chemical composition of extract from *Nephelium lappaceum* L. (Mexican rambutan) husk. **Asian Pac. J. Trop. Med.** 10(12): 1201-1205.

Khonkarn, R., S. Okonogi, C. Ampasavate and S. Anuchapreeda. 2010. Investigation of fruit peel extracts as sources for compounds with antioxidant and antiproliferative activities against human cell lines. **Food Chemical. Toxicol.** 48(8): 2122-2129.

Kubo, I., I. Kinst-Hori, S.K. Chaudhuri, Y. Kubo, Y. Sánchez and T. Ogura. 2000. Flavonols from *Heterotheca inuloides*: tyrosinase inhibitory activity and structural criteria. **Bioorgan. Medl. Chem.** 8(7): 1749-1755.

Kubola, J. and S. Siriamornpun. 2008. Phenolic contents and antioxidant activities of bitter gourd (*Momordica charantia* L.) leaf, stem and fruit fraction extracts in vitro. **Food Chem.** 110(4): 881-890.

Kumar, S., D. Kumar, K. Saroha, N. Singh and B. Vashishta. 2008. Antioxidant and free radical scavenging potential of *Citrullus colocynthis* (L.) Schrad. methanolic fruit extract. **Acta Pharmaceut.** 58(2): 215-220.

Lajis, A.F., A. Hamid and A.B. Ariff. 2012. Depigmenting effect of Kojic acid esters in hyperpigmented B16F1 melanoma cells. **J. Biomed. Biotechnol.** doi: 10.1155/2012/952452.

Mahmood, K., H. Kamilah, A.K. Alias and F. Ariffin. 2018. Nutritional and therapeutic potentials of rambutan fruit (*Nephelium lappaceum* L.) and the by-products: a review. **J. Food Meas. Charact.** 12(3): 1556-1571.

Moreira, J., L.C. Klein-Junior, V.C. Filho and F.C. Buzzi. 2013. Anti-hyperalgesic activity of corilagin, a tannin isolated from *Phyllanthus niruri* L. (Euphorbiaceae). **J. Ethnopharmacol.** 146: 318-323.

Palanisamy, U., L.T. Ling, T. Manaharan and D. Appleton. 2011. Rapid isolation of geraniin from *Nephelium lappaceum* rind waste and its anti-hyperglycemic activity. **Food Chem.** 127(1): 21-27.

Panzella, L. and A. Napolitano. 2019. Natural and Bioinspired Phenolic Compounds as Tyrosinase Inhibitors for the Treatment of Skin Hyperpigmentation: Recent Advances. **Cosmatics.** 57(6).

Re, R.,N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang and C. Rice-Evans. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Bio. Med.** 26(9): 1231-1237.

Saewan, N., S. Koysomboon and K. Chantrapromma. 2011. Anti-tyrosinase and anti-cancer activities of flavonoids from *Blumea balsamifera* DC. **J. Med. Plants Res.** 5(6): 1018-1025.

Tabata, H., T. Katsube, T. Tsuma, Y. Ohta, N. Imawaka and T. Utsumi. 2008. Isolation and evaluation of the radical-scavenging activity of the antioxidants in the leaves of an edible plant, *Mallotus japonicas*. **Food Chem.** 109(1): 64-71.

Thitilertdecha, N., and N. Rakariyatham. 2011. Phenolic content and free radical scavenging activities in rambutan during fruit maturation. **Sci. Horti.** 129: 247-252.

Zhu, K., H. Zhou and H. Qian. 2006. Antioxidant and free radical-scavenging activities of wheat germ protein hydrolysates (WGPH) prepared with alcalase. **Process Biochem.** 41(6): 1296-1302.

การวิเคราะห์ต้นทุนฐานกิจกรรมผลิตภัณฑ์ไหมไทย: กรณีศึกษากลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกหม่อนเลี้ยงไหมบ้านคึมมะอุ

Analysis of Activity-Based Costing for Silk Products: A Case Study of Khumma-U Community Enterprise

ณุกานดา เชิดชูธีรกุล[1] อภิชญา ลีลาวณิชกุล[1*] และ กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล[2]

Nukanda Choedchuthirakun[1], Apichaya Lilavanichakul[1*] and Korntip Watcharapanyawong Techamatheekul[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์จากไหมของวิสาหกิจชุมชน 2 ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ใบหม่อน และผ้าไหม โดยวิธีระบบต้นทุนฐานกิจกรรม เพื่อให้ทราบถึงต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ และสามารถวิเคราะห์กิจกรรมต่าง ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการผลิตว่ามีกิจกรรมใดบ้างที่ก่อให้เกิดมูลค่าโดยเลือกกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มปลูกหม่อนเลี้ยงไหมคึมมะอุ จังหวัดนครราชสีมา เป็นกรณีศึกษา โดยผลที่ได้จากการศึกษาต้นทุนของใบหม่อนพบว่า ใบหม่อนมีต้นทุนต่อหน่วย 4.30 บาทต่อกิโลกรัม โดยต้นทุนของกิจกรรมการขนส่งมีสัดส่วนมากที่สุด 63.21% รองลงมาคือ กิจกรรมเก็บเกี่ยว 28.23% กิจกรรมเตรียมดิน 4.67% และกิจกรรมรดน้ำ 3.90% ตามลำดับ ส่วนต้นทุนของผลิตภัณฑ์ผ้าไหมมีต้นทุนต่อหน่วย 694 บาทต่อเมตร โดยกิจกรรมฟอกและย้อมสีเส้นไหมมีต้นทุนกิจกรรมสูงที่สุด คิดเป็น 22.83% กิจกรรมรองลงมาคือ กิจกรรมเลี้ยงหนอนไหม คิดเป็น 22.42% กิจกรรมทอผ้าไหม คิดเป็น 21.36% และกิจกรรมปลูกหม่อน คิดเป็น 20.66% ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่า การผลิตของผลิตภัณฑ์จากไหมของวิสาหกิจชุมชนมีต้นทุนด้านแรงงานมากกว่าด้านอื่น ๆ ดังนั้นการมีเครื่องจักรหรือนวัตกรรมมาใช้เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตอาจจะทำให้ลดต้นทุนและช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์จากไหมได้มากขึ้น

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the production cost of mulberry leaves and silk for a community enterprise by using the activity-based costing method in order to define the cost per unit and to determine value added activities. Khumma U community enterprise in Nakhon Ratchasima province is selected for this study. Findings shown that the cost per unit of mulberry leaves is about 4.30 baht/kg. It is found that the highest activity cost is transporting at 63.21%, followed by harvesting at 28.23%, preparing the soil at 4.67% and watering at 3.90%. respectively. The results of silk product are that the total cost per unit of silk is about 694 baht/meter. The highest activity cost is bleaching and dyeing 22.83%, followed by rearing of silk worm at 22.42%, silk weaving at 21.36%, and mulberry cultivating at 20.66%. Overall outcome suggests that mulberry leaves and silk production of community enterprise mainly relies on the labor cost more than other activity costs. Thus, the implementation of machines or innovation to develop the silk production will help the community to reduce the production cost and to add value to the silk products.

Key words: silk, costs, mulberry leaves, activity-based costing, community enterprise

* Corresponding author; e-mail address: apichaya.l@ku.ac.th

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้รับการยอมรับจากทั่วโลก ในประเทศไทยผ้าไหมถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่สะท้อนถึงเอกลักษณ์ของภูมิปัญญาชาวบ้าน ซึ่งแต่ละท้องถิ่นจะมีลวดลายผ้าไหมที่มีเอกลักษณ์แตกต่างกันไป มีแหล่งผลิตกระจายไปทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยมีแหล่งผลิตสำคัญอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปริมาณเส้นไหมไทยพื้นบ้านที่มีการผลิตในแต่ละปี ประมาณ 800-1,000 ตัน โดยร้อยละ 98 มาจากภาคอีสาน (กรมหม่อนไหม,2555) รวมถึงจังหวัดนครราชสีมาที่มีแหล่งผลิตไหมหัตถกรรมอยู่ตามชุมชนในหลายอำเภอ มีกระบวนการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมที่ครบวงจร เริ่มต้นตั้งแต่การปลูกหม่อนเลี้ยงไหม ผลิตเส้นไหม ทอผ้าไหมเป็นลวดลายต่าง ๆ ตามเอกลักษณ์ในแต่ละท้องถิ่น การปลูกหม่อนและแปรรูปผลิตภัณฑ์ไหม จึงถือเป็นอาชีพเสริมที่ช่วยสร้างรายได้ให้แก่ชาวบ้านเกษตรกร และช่วยยกระดับความเป็นอยู่ของคนในท้องถิ่น อีกทั้งยังช่วยสืบสานภูมิปัญญาท้องถิ่นที่เป็นมรดกสืบทอดกันมา

ในปัจจุบันเกษตรกรส่วนใหญ่ยังขาดองค์ความรู้ในการจัดการด้านการปลูกหม่อนเลี้ยงไหม เช่น การจัดการผลิตใบหม่อนไม่เพียงพอต่อการเลี้ยงไหมในแต่ละรุ่น การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการเลี้ยงไม่เหมาะสมกับแผนการเลี้ยงไหม ตลอดจนไม่มีการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่ถูกต้อง (กรมหม่อนไหม, 2560ก) จึงต้องมีการส่งเสริมในแต่ละชุมชนหัตถกรรมผ้าไหมไทยให้มีการรวมกลุ่มกันในลักษณะเครือข่ายวิสาหกิจชุมชน เพื่อให้มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเข้าไปอบรมพัฒนาทักษะอาชีพ เพื่อสร้างศักยภาพและความเข้มแข็งให้แก่ชุมชน ส่งเสริมให้ชุมชนได้มีการนำภูมิปัญหาท้องถิ่นมาสร้างสรรค์เพิ่มมูลค่าให้แก่ตัวสินค้า ซึ่งแต่ละวิสาหกิจชุมชนมีความสามารถในการเพิ่มมูลค่าไหมได้แตกต่างกัน โดยเกิดได้จากหลายปัจจัยได้แก่ ผู้นำชุมชน ความร่วมมือของคนในชุมชน ความเป็นเอกลักษณ์ของประเพณีของคนในท้องถิ่น และประสิทธิภาพของต้นทุนการผลิต ซึ่งเรื่องการวิเคราะห์ต้นทุน อาจมีการวิเคราะห์ต้นทุนที่ต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งอาจทำให้ไม่ทราบถึงมูลค่าที่สามารถจะเพิ่มได้ของผลิตภัณฑ์ จากสถิติการส่งออกผ้าไหมของประเทศไทยในปี 2560 มีมูลค่า 7.2 ล้านบาท (กรมหม่อนไหม, 2560ข) ในจังหวัดนครราชสีมามีเกษตรกรประกอบอาชีพปลูกหม่อนเลี้ยงไหมในพื้นที่ 16 อำเภอ เกษตรกร 4,625 ราย พื้นที่ปลูกหม่อน 3,790 ไร่ มีผู้ประกอบการผลิตและทอผ้าไหม 202 กลุ่ม ผลิตเส้นไหมได้ประมาณ 35 – 40 ตัน คิดเป็นมูลค่า 45 ล้านบาท (สมพงษ์, 2555) และมีวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดนครราชสีมาที่ประกอบอาชีพปลูกหม่อน เลี้ยงไหม และทอผ้าไหม ทั้งหมด 79 ราย (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2562) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกหม่อนเลี้ยงไหมคึมมะอุ เป็นหมู่บ้านไหมครบวงจรตั้งแต่การ ปลูกหม่อน เลี้ยงหนอนไหม สาวเส้นไหม กระบวนการฟอกย้อมด้วยสีธรรมชาติและสีสังเคราะห์ การผลิตผ้าผืนโดยใช้ทั้งเส้นพุ่งและเส้นยืนจากชาวบ้านในชุมชน มีการก่อตั้งกลุ่มวิสาหกิจชุมชน เมื่อ พ.ศ. 2542 มีสมาชิก 170 ราย จากเดิมพื้นที่บริเวณนี้ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ กรมหม่อนไหมร่วมมือกับกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้นำการเกษตรแบบแปลงใหญ่เข้ามาสนับสนุนในปี 2559 พัฒนาพื้นที่บริเวณนี้มาเป็นแปลงปลูกหม่อนแปลงใหญ่ที่มีพื้นที่ติดกันเป็นพื้นเดียวจำนวน 300 ไร่ (กรมหม่อนไหม, 2561) และมีการสร้างระบบชลประทาน ทำให้แปลงหม่อนมีน้ำตลอดทั้งปี ส่งผลให้เกษตรกรมีผลผลิตเพิ่มขึ้น และยังเป็นการส่งเสริมให้เกษตรกรสามารถแปรรูปผลิตภัณฑ์ไหมได้เพิ่มมากขึ้น เช่น ผ้าไหม แผ่นใยไหม แต่อย่างไรก็ตามไม่มีการศึกษาถึงต้นทุนการผลิตไหมที่ชัดเจน จึงทำให้เกษตรกรยังไม่สามารถกำหนดมูลค่าที่เหมาะสมแก่ผลิตภัณฑ์ได้ โดยผลจากการศึกษาต้นทุนในการผลิตจะช่วยให้เกษตรกรทราบถึงต้นทุนที่แท้จริงและกำหนดมูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม เกษตรกรอาจจะนำแนวทางไปปรับลดบางกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า ส่งผลให้ลดต้นทุนการผลิตลงได้

งานวิจัยนี้ ศึกษาโครงสร้างต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์แปรรูปไหมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกหม่อนเลี้ยงไหมบ้านคึมมะอุ ได้แก่ ใบหม่อนและผ้าไหม โดยการวิเคราะห์ต้นทุนด้วยระบบต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-based Costing) มาจัดสรรปันส่วนในกระบวนการผลิตให้เป็นต้นทุนกิจกรรม เพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนจากกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า รวมไปถึงการกำหนดราคาผลิตภัณฑ์แก่วิสาหกิจชุมชน หรือผู้ประกอบการที่จะนำไปใช้เป็นประโยชน์ได้

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจประชากรของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนอาชีพปลูกหม่อน เลี้ยงไหม ทอผ้าไหมทอ และแปรรูปผลิตภัณฑ์จากไหม โดยทำการสำรวจกลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกหม่อนเลี้ยงไหมคึมมะอุ อำเภอบัวลาย ในเขตพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับกลุ่มอาชีพปลูกหม่อนเลี้ยงไหม และทอผ้าไหมทอมือพื้นบ้านที่มีคุณภาพดีและเป็นที่รู้จักของผู้บริโภค มีการเก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามโดยการสัมภาษณ์แบบตัวต่อตัว (Face-to-face) ซึ่งผู้ให้สัมภาษณ์เป็นสมาชิกของกลุ่มอาชีพผ้าไหมทอมือ และมีความชำนาญในด้านการผลิตผ้าไหม จำนวนทั้งสิ้น 53 ราย

โดยข้อมูลที่เก็บได้สามารถนำมาวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปด้านประชากรศาสตร์ของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยใช้วิธีการตามหลักสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ได้แก่ ค่าร้อยละ (Percentage) และค่าแจกแจงความถี่ (Frequency)

ส่วนที่ 2 ข้อมูลด้านต้นทุนของการปลูกหม่อนและการผลิตผ้าไหมโดยวิธีต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-based Costing: ABC)

Table 1 Cost structure of mulberry leaves and silk identified by activities.

Main Activities	Sub-activities
Mulberry leaves	
A1. Preparing the soil	Plowing the soil; planting mulberry trees; adding fertilizer
B1. Watering	Watering the mulberry trees
C1. Harvesting	Collecting mulberry leaves
D1. Transporting	Preparing trucks; managing the truck routes and delivery; organizing the truck loads
Silk	
A2. Mulberry Cultivation	Plowing the soil; planting mulberry trees; adding fertilizers; watering the mulberry trees; Collecting mulberry leaves.
B2. Rearing of Silk Worms	Collecting silk egg; transferring silkworms to baskets; feeding the fresh mulberry leaves.
C2. Silk Reeling	Screening out the pour quality of cocoons; putting cocoons into pot; boiling cocoons in the hot water; silk reeling; collecting the silk thread.
D2. Bleaching and Dyeing	Removing serein form the silk; bleaching; binding the thread; Dyeing
E2. Silk Weaving	Silk weaving

ต้นทุนกิจกรรม ABC (วรศักดิ์, 2544) เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนเกิดจากกิจกรรมแต่ละกิจกรรมในกระบวนการผลิต และทำการวิเคราะห์ทรัพยากรที่ถูกใช้ไปในแต่ละกิจกรรม โดยการคำนวณต้นทุนกิจกรรม ABC ประกอบด้วยขั้นตอนทั้งหมด 6 ขั้นตอนหลัก โดย 1) สำรวจและวิเคราะห์การดำเนินงานของการปลูกหม่อนเลี้ยงไหม และระบุกิจกรรม (activity) ที่ก่อให้เกิดการผลิตใบหม่อนและผ้าไหม โดยสามารถแบ่งกิจกรรมหลัก (Main-Activities) และกิจกรรมสนับสนุน (Sub-activities) ได้ดังตารางที่ 1 กิจกรรมต้นทุนของใบหม่อน สามารถแบ่งได้เป็น 5 กิจกรรมหลัก การเตรียมดิน (Preparing the soil) การรดน้ำ (Watering) การเก็บเกี่ยว (Harvesting) และการขนส่ง (Transporting) ส่วนต้นทุนของผ้าไหม สามารถแบ่ง ได้ทั้งหมด 5 กิจกรรมหลัก ได้แก่ การปลูกหม่อน (Mulberry Cultivation) การเลี้ยงไหม (Rearing of Silk Worms) การสาวเส้นไหม (Silk Reeling) การฟอกและย้อมสีเส้นไหม (Bleaching and Dyeing) และการทอผ้าไหม (Silk Weaving) 3) รวบรวมต้นทุนของปัจจัยการผลิตและทรัพยากรทั้งหมดที่ใช้ในการดำเนินกิจกรรม โดยจำแนกประเภทของต้นทุนเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ต้นทุนด้านแรงงาน (Labor Cost) ต้นทุนด้านวัตถุดิบ (Material Cost) ต้นทุนด้านเครื่องจักรและอุปกรณ์ (Machinery Cost) และปันส่วนต้นทุนเข้าสู่ต้นทุนตามกิจกรรม โดยที่ผลรวมของต้นทุนแต่ละประเภทต้องมีผลรวมกันเป็น 100% 4) ระบุตัวผลักดันต้นทุนกิจกรรม (Cost drive) ของแต่ละกิจกรรม เพื่อใช้เป็นฐานในการคำนวณอัตราต้นทุนต่อตัวผลักดันต้นทุน เช่น ความยาวของผ้าไหม 5) คำนวณต้นทุนกิจกรรมต่อหน่วยของตัวผลักดันต้นทุนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ใบหม่อน (หน่วย บาทต่อกิโลกรัม) และผ้าไหม (หน่วย บาทต่อเมตร) และรวมต้นทุนแต่ละกิจกรรมในการผลิตที่คำนวณได้จะได้ต้นทุนรวมของผลิตภัณฑ์ใบหม่อนและผ้าไหม ซึ่งต้นทุนกิจกรรม ABC จะแตกต่างจากการคำนวณต้นทุนแบบดั้งเดิมตรงที่ต้นทุนที่ได้จากการวิเคราะห์ต้นทุนกิจกรรมไม่ได้ผันแปรไปตามปริมาณการผลิตเพราะเป็นการคิดต้นทุนต่อหน่วย นอกจากนี้ต้นทุนกิจกรรมยังใช้วิธีปันส่วนค่าใช้จ่ายตามเกณฑ์การปันส่วนค่าใช้จ่ายหลายเกณฑ์ทำให้ผลที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำมากกว่าวิธีคิดต้นทุนแบบอื่น (รุธิร์, 2549) และหลังจากที่คำการคำนวณต้นทุนของผลิตภัณฑ์แล้วนั้นได้ทำการคิดอัตราส่วนกำไรขั้นต้น (Gross Profit Margin) โดยนำกำไรที่ได้จากการนำราคาขายมาหักลบด้วยต้นทุนของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ แล้วหารด้วยราคาขายคูณด้วย 100 ซึ่งอัตราส่วนกำไรขั้นต้น (Gross Profit Margin) เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์การเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ข้อมูลทางประชากรศาสตร์ของของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

จากกลุ่มตัวอย่างของวิสาหกิจชุมชน ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง ร้อยละ 92.5 มีอายุระหว่าง 46 – 55 ปี โดยส่วนมากนั้นจะมีพื้นที่ปลูกหม่อน 1 ไร่ ขึ้นไป ร้อยละ 56.6 มีประสบการณ์ประกอบอาชีพไหมตั้งแต่ 21 ปีขึ้นไป ร้อยละ 75.5 กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยประกอบอาชีพผ้าไหมเป็นอาชีพหลัก ร้อยละ 7.5 โดยส่วนใหญ่แล้วประกอบอาชีพทำไร่ทำนาเป็นอาชีพหลักร้อยละ 92.7 เมื่อว่างจากการทำนาหรือทำไร่ จึงทอผ้าเพื่อเป็นการสืบสานภูมิปัญญาท้องถิ่นและเพื่อเป็นรายได้เสริมให้แก่ครอบครัว

Table 2 Demography of Khumma-U community enterprise (n = 53).

Demography	Frequency (People)	Percentage
1. Gender		
Female	49	92.5
Male	4	7.5
2. Age		
35 - 45 years	9	17.0
46 - 55 years	30	56.6
More than 56 years	14	26.4
3. Number of family members		
Less than 5 people	33	62.3
More than 5 people	20	37.7
4. Occupation		
Farmer	49	92.5
Sericulture	4	7.5
5. Experience in Sericulture		
10 - 15 years	7	13.2
16 – 20 years	6	11.3
More than 21 years	40	75.5
6. Mulberry cultivation area		
Less than 1 rai	24	43.4
More than 1 rai	29	56.6

2. ต้นทุนผลิตภัณฑ์หม่อนไหมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกหม่อนเลี้ยงไหมคืมมะอุ

ต้นทุนการผลิตของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนโดยวิธีต้นทุนฐานกิจกรรม จะแบ่งเป็นผลิตภัณฑ์ 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ การปลูกหม่อน ดังแสดงในตารางที่ 3 และการผลิตผ้าไหม ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยมีตัวผลักดันต้นทุนทั้งหมด 3 ตัวได้แก่ ต้นทุนด้านแรงงาน (Labor Cost) ต้นทุนด้านวัตถุดิบ (Material Cost) และต้นทุนด้านเครื่องจักร (Machinery Cost) (วัลวิสา, 2553)

Table 3 Cost of Mulberry leaves by Activities.

Main Activity	Labor Cost (%)	Material Cost (%)	Machinery cost (%)	Total Activity Cost (%)	Cost (Baht/kilogram)
A1. Prepare the soil	1.64	63.16	19	4.67	
B1. Watering	1.19	36.84	44	3.90	4.30
C1. Harvesting	29.20	-	37	28.23	
D1. Transporting	67.97	-	-	63.20	

กิจกรรมการปลูกหม่อนสามารถแบ่ง เป็นกิจกรรมหลักได้ 5 กิจกรรม ได้แก่ กิจกรรมเตรียมดิน กิจกรรมรดน้ำ กิจกรรมการเก็บเกี่ยว จากตารางที่ 3 พบว่า ใบหม่อนมีต้นทุน 4.30 บาทต่อกิโลกรัม กิจกรรมการขนส่ง มีต้นทุนด้านแรงงานสูงที่สุด คิดเป็น 67.97% กิจกรรมที่มีต้นทุนค่าแรงรองลงมาคือกิจกรรมเก็บเกี่ยว 29.20% ต้องใช้เวลาประมาณ 16 วัน ในแต่ละรุ่น สำหรับการเก็บใบหม่อนเพื่อไปเลี้ยงหนอนไหม จึงเป็นสาเหตุทำให้มีค่าแรงที่สูงกว่ากิจกรรมอื่น และต้นทุนด้านแรงงานที่น้อยที่สุดคือกิจกรรมเตรียมดิน คิดเป็น 1.64% เนื่องจากการเตรียมดินจะเป็นกิจกรรมที่ทำเฉพาะตอนที่จะปลูกต้นหม่อน ในส่วนของต้นทุนด้านวัตถุดิบ กิจกรรมการเตรียมดินมีต้นทุนสูงที่สุด คิดเป็น 63.16% เนื่องจากต้องมีการดูแลดินใส่ปุ๋ยเพื่อบำรุงต้นหม่อน ส่วนต้นทุนรวมของกิจกรรมสูงที่สุดคือกิจกรรมการขนส่งคิดเป็น 63.20% เนื่องจากว่าต้องจ้างรถเพื่อนำใบหม่อนไปส่งยังบริษัทคู่ค้า ส่วนต้นทุนรวมของกิจกรรมรองลงมาคือกิจกรรมเก็บเกี่ยว 28.23% และกิจกรรมที่มีต้นทุนรวมต่ำที่สุดคือ กิจกรรมรดน้ำ 3.90% เนื่องจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนใช้ใบหม่อนพันธุ์สกลนคร ซึ่งเป็นพันธุ์ที่ทนต่อความแล้งจึงไม่ต้องทำการรดน้ำบ่อย อาจจะต้องดูแลอย่างเป็นพิเศษเมื่อถึงช่วงหน้าแล้ง

Table 4 Cost of Silk by activities.

Main Activity	Labor Cost (%)	Material Cost (%)	Machinery Cost (%)	Total Activity Cost (%)	Cost (Baht/Meter)
A2. Mulberry cultivation	20.08	34	14	20.66	
B2. Rearing of silk worms	23.14	5	31	22.42	
C2. Silk reeling	11.96	29	9	12.73	694.00
D2. Bleaching and Dyeing	22.76	32	5	22.83	
E2. Silk weaving	22.06	-	42	21.36	

จากตารางที่ 4 พบว่าต้นทุนฐานกิจกรรมของผลิตภัณฑ์ผ้าไหมทั้ง 5 กิจกรรมหลัก ในส่วนของกิจกรรมเลี้ยงหนอนไหม มีต้นทุนในเรื่องแรงงานมากที่สุดคิดเป็น 23.14% รองลงมาคือ กิจกรรมฟอกและมัดย้อมสีเส้นไหม 22.76% กิจกรรมทอผ้า 22.06% กิจกรรมปลูกหม่อน 22.08% และกิจกรรมสาวเส้นไหม 11.96% ตามลำดับ ในส่วนของเรื่องต้นทุนวัตถุดิบ กิจกรรมปลูกหม่อนมีต้นทุนสูงที่สุด คิดเป็น 34% รองลงมาได้แก่ กิจกรรมฟอกและมัดย้อมเส้นไหม 32% กิจกรรมสาวเส้นไหม 29% กิจกรรมเลี้ยงหนอนไหม 5% ตามลำดับ ส่วนต้นทุนด้านเครื่องจักร กิจกรรมทอผ้ามีต้นทุนสูงที่สุด 42% เนื่องจากเป็นกิจกรรมที่ต้องมีความพิถีพิถันต้องใช้เครื่องมือหลายอย่าง จากตารางที่ 4 สามารถสรุปได้ว่า กิจกรรมที่มีต้นทุนรวมของกิจกรรมมากที่สุด คือ กิจกรรมฟอกและย้อมเส้นไหม คิดเป็น 23.83% เนื่องจากกิจกรรมฟอกและย้อมเส้นไหม เป็นกิจกรรมที่มีหลายขั้นตอนซึ่งในแต่ละขั้นตอนต้องใช้เวลา เช่นฟอกเส้นไหม มัดลาย ย้อมเส้นไหม เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นกิจกรรมที่มีค่าแรงค่อนข้างสูง เนื่องจากเกษตรกรใช้เวลานานในการฟอกย้อมไหม และกิจกรรมที่มีต้นทุนรวมของกิจกรรมน้อยที่สุด คือกิจกรรมสาวเส้นไหม 12.73% โดยผ้าไหมมีต้นทุนต่อหน่วย 694 บาทต่อเมตร

Table 5 Cost and Profit of Products.

Products	Cost (Baht/Unit)	Price (Baht/Unit)	Gross Profit Margin (%)
Mulberry leaves	4.30 Baht/Kilogram	12 Baht/Kilogram	64.17
Silk	694 Baht/Meter	1,000 Baht/Meter	30.60

จากตารางที่ 5 ใบหม่อน มีต้นทุน 4.30 บาทต่อกิโลกรัม โดยมีราคาขายกิโลกรัมละ 12 บาท และมีอัตรากำไรขั้นต้น (Gross Profit Margin) อยู่ที่ 64.17% ซึ่งการผลิตใบหม่อนสามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่เกษตรกรเป็นอย่างมาก ถือเป็นแหล่งรายได้อีกช่องทางหนึ่งที่ดีให้แก่เกษตรกร ประกอบกับในปัจจุบันการผลิตใบหม่อนไม่เพียงพอต่อการความต้องการในตลาด โดยเฉพาะพื้นที่ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศที่แห้งแล้ง จึงทำให้บางพื้นที่ไม่สามารถปลูกใบหม่อนได้เพียงพอ แต่เนื่องจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกหม่อนเลี้ยงไหมคืมมะอุ ได้รับการสนับสนุนโครงการเกษตรแปลงใหญ่จากภาครัฐ แปลงหม่อนของบ้านคืมมะอุจึงมีระบบชลประทานที่มีประสิทธิภาพและมีผลผลิตใบหม่อนมากขึ้น ในส่วนของผลิตภัณฑ์ผ้าไหมมีต้นทุน 694 บาทต่อเมตร โดยผ้าไหมมัดหมี่ลายพื้นบ้านมีราคาขายโดยประมาณ 1,000 บาทต่อเมตร และมีอัตรากำไรขั้นต้นอยู่ที่ 30.60% ซึ่งผ้าไหมมัดมีราคาขายโดยประมาณเริ่มตั้งแต่ 1,000 บาทต่อเมตร ในการเพิ่มมูลค่าผ้าไหมนั้นอาจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความยากง่ายของลายผ้า ระยะเวลาการผลิต วัตถุดิบเส้นไหมที่ใช้ โดยการผลิตผ้าไหมถือเป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์ที่สร้างรายได้เสริมจากการทำเกษตรให้กับเกษตรกรได้ดี แต่ต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของผู้ทอเป็นสำคัญ

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาต้นทุนของการผลิตไหมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกหม่อนเลี้ยงไหมคืมมะอุ โดยวิธีต้นทุนฐานกิจกรรม พบว่าต้นทุนรวมต่อหน่วยของใบหม่อนเท่ากับ 4.30 บาทต่อกิโลกรัม มีการซื้อขายใบหม่อนอยู่ที่ราคากิโลกรัมละ 12 บาท ช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่เกษตรกรได้ถึง 64.17% จากต้นทุนที่คำนวณได้ ซึ่งกิจกรรมต้นทุนส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมการขนส่ง 63.20% โดยมาจากต้นทุนด้านแรงงานถึง 67.97% กิจกรรมการรดน้ำมีต้นทุนรวมต่อหน่วยน้อยที่สุด 3.90% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนกับราคาที่เกษตรกรขายได้แล้วนั้นจากการคำนวณอัตรากำไรขั้นต้นถือว่ามีความคุ้มค่า แต่ถ้าหากเกษตรกรมีการปรับลดต้นทุนกิจกรรมการขนส่ง ด้านแรงงานลง เช่น การไม่จ้างการขนส่งจากภายนอกโดยมีรถขนส่งของวิสาหกิจชุมชนเอง อาจจะช่วยลดต้นทุนในระยะยาวลงได้ ส่วนผลิตภัณฑ์ผ้าไหม มีต้นทุนรวมต่อหน่วย 694 บาทต่อเมตร ราคาขายผ้าไหม 1,000 บาทต่อเมตร ช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์ผ้าไหมถึง 30.6% โดยมีต้นทุนกิจกรรมฟอกและย้อมสีเส้นไหมสูงที่สุด คิดเป็น 23.83% ในส่วนของต้นทุนด้านแรงงานพบว่ากิจกรรมเลี้ยงหนอนไหมมีต้นทุนในด้านแรงงานมากที่สุดคิดเป็น 23.14% กิจกรรมปลูกหม่อนมีต้นทุนด้านวัตถุดิบสูงที่สุด คิดเป็น 34% กิจกรรมทอผ้ามีต้นทุนด้านเครื่องจักรสูงที่สุด 42% หากเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนกับราคาขายของผลิตภัณฑ์ผ้าไหมจากการคำนวณอัตรากำไรขั้นต้นถือว่ามีความคุ้มค่าไม่มานัก จากการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ให้ความเห็นว่าการผลิตผ้าไหมถ้าพูดถึงเรื่องความคุ้มทุนอาจจะไม่คุ้มมากนักเนื่องจากการผลิตผ้าไหมเสมือนเป็นการสืบทอดวัฒนธรรมที่สืบต่อกันมาจากรุ่นสู่รุ่น ทำให้เกิดคุณค่าทางจิตใจเป็นสำคัญ ผู้ผลิตผ้าไหมส่วนใหญ่ไม่ได้คำนึงความคุ้มค่าจากการจำหน่ายมากนักเน้นการผลิตเพื่อใช้ในประเพณีโบราณ การได้กำไรจากการจำหน่ายนั้นถือว่าเป็นผลพลอยได้

จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าต้นทุนในการผลิตไหมสูงเนื่องจากการผลิตไหมในประเทศไทยนั้นยังเป็นการผลิตแบบหัตถกรรมพื้นบ้าน โดยใช้แรงงานทุกกระบวนการ อีกทั้งกิจกรรมการขนส่งใบหม่อนเป็นกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า ถ้าหากวิสาหกิจชุมชนมีพาหนะขนส่งที่เป็นตัวเองเพื่อรวบรวมการขนส่งอาจจะทำให้ลดเรื่อง

ต้นทุนการขนส่งลงได้ จึงทำให้การผลิตไหมมีต้นทุนในเรื่องแรงงานสูง ดังนั้นถ้าหากมีเครื่องจักรโดยเฉพาะสาวเส้นไหมมาช่วยให้เพิ่มจำนวนการเลี้ยงไหมต่อรอบได้ จะช่วยลดระยะเวลาการทำงานและต้นทุน เนื่องจากเกษตรกรไม่สามารถสาวเส้นไหมด้วยมือได้ทันตามความต้องการของเส้นไหมที่มีเพิ่มมากขึ้น ส่วนการผลิตไหมตามแนวคิดเกษตรอินทรีย์โดยการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมโดยการปลูกหม่อนไร้สารพิษและการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ แต่การทำเกษตรแบบอินทรีย์อาจส่งผลให้มีต้นทุนที่สูงขึ้นจากกิจกรรมในการผลิตที่เพิ่มมากขึ้น และการนำสีจากวัสดุจากธรรมชาติมาย้อมสีเส้นไหมโดยนวัตกรรมเหล่านี้อาจจะช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่กิจกรรมและผลิตภัณฑ์ได้จากการรักษาสิ่งแวดล้อม อีกทั้งชุมชนนั้นยังเป็นชุมชนที่มีสิ่งแวดล้อมที่ปลอดสารพิษส่งผลให้เกษตรกรมีสุขสภาพและคุณภาพชีวิตที่ดี แต่อย่างไรก็ตามควรคำนึงถึงความต้องการของผู้บริโภคในตลาดเป็นหลัก ทั้งนี้เกษตรกรผู้ปลูกหม่อนเลี้ยงไหมสามารถนำต้นทุนการปลูกหม่อน และการผลิตผ้าไหม ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ไปพิจารณาถึงกระบวนการผลิตเพื่อปรังปรุงการผลิตให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นอีกทั้งยังช่วยเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย ซึ่งวิสาหกิจชุมชนยังสามารถนำแนวคิดมาใช้ในการพิจารณาว่ากิจกรรมใดที่สามารถช่วยเพิ่มมูลค่าแล้วสามารถนำแนวคิดมาตั้งราคาผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการวิจัยการพัฒนาต้นแบบระบบการผลิตและนวัตกรรมไหมไทยเพื่อยกระดับเศรษฐกิจท้องถิ่นผ่านการขับเคลื่อนประเทศไทย 4.0 อย่างยั่งยืน ที่ให้โอกาสและแนวทางสำหรับในการไปลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูล และขอขอบคุณสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกหม่อนเลี้ยงไหมคืมมะอุจังหวัดนครราชสีมาที่ได้ให้ข้อมูลประกอบการศึกษาในวิจัยนี้รวมถึงอาจารย์ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดทั้งงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร . 2562. **ระบบสารสนเทศข้อมูลวิสาหกิจชุมชน** (Online). https://smce.doae.go.th/index.php, 19 พฤศจิกายน 2562.

กรมหม่อนไหม. 2555. **ภูมิปัญญาการผลิตเส้นไหมไทยพื้นบ้านอีสาน** (Online). http://qsds.go.th/ocs/file_upload/2013-07-25-Wisdom_of_indigenous _Thai_Silk_Yarn.pdf, 20 พฤศจิกายน 2562.

กรมหม่อนไหม. 2560ก. **ยุทธศาสตร์กรมหม่อนไหม ระยะ 20 ปี (2560 – 2579)** (Online). https://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/-20171121/2017qsds-thailand-.4pdf, 21 พฤศจิกายน 2562

กรมหม่อนไหม. 2560. **มูลค่าการส่งออก-นำเข้ารังไหม เส้นไหม ผ้าไหม และผลิตภัณฑ์ไหม 2560** (Online). https://qsds.go.th/wp-content/uploads/2018/11/Asian10.pdf, 20 พฤศจิกายน 2562.

กรมหม่อนไหม. 2561. **การทำหม่อนไหมเกษตรแปลงใหญ่** (Online). http:///122.154.22.188newqsds/inside_news.php?newsid=2654, 21 พฤศจิกายน 2562

รุธิร์ พนมยงค์. 2549. **การวิเคราะห์ต้นทุนโลจิสติกส์แบบ ABC.** องค์การส่งเสริมการค้าต่างประเทศของญี่ปุ่น, กรุงเทพฯ.

วรศักดิ์ ทุมมานนท์. 2554. **ระบบการบริหารต้นทุนกิจกรรม** Activity Based Costing: ABC. สำนักพิมพ์ไอโอนิค, กรุงเทพฯ.

วัลวิสา ศานติกุลวงศ์. 2553. **การนำระบบต้นทุนฐานกิจกรรมมาใช้เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการทำกำไรของหน่วยธุรกิจ: กรณีศึกษาบริษัท** ABC **ประกันวินาศภัย จำกัด**. การศึกษาค้นคว้าอิสระ,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมพงษ์ จันทร์พิทักษ์พิทักษ์. 2556. **การส่งเสริมและพัฒนาอาชีพปลูกหม่อนเลี้ยงไหม** . แหล่งที่มา: http://www.khorat.doae.go.th/, 18 พฤศจิกายน 2562.

ผลของสภาวะจำลองระบบการย่อยในทางเดินอาหารในหลอดทดลองต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันและฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสจากสารสกัดผสมมะม่วงหาวมะนาวโห่และพลับ

Effects of *In Vitro* Simulated Gastrointestinal Digestion on the Antioxidant and α-Glucosidase Inhibitory Activities from a Mixed Extract of *Carissa carandas* Linn. and *Diospyros kaki* L.

เกสรี กลิ่นสุคนธ์ [1]อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ[1*] ประภัสสร รักถาวร[1] ลลิตา คชารัตน์[1] สุริสา สากยโรจน์[1] ทิพาพร ทองคำ[1] และ ณัฐภรณ์ เปรสันเทียะ[1]

Ketsaree Klinsukhon[1], Udomlak Sukatta[1*], Prapasson Rukthaworn[1], Lalita Khacharat[1], Surisa Sakayaroj[1], Thipaporn Thongkum[1] and Natthaporn Presunthiah[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสภาวะจำลองระบบการย่อยในทางเดินอาหารของสารสกัดผสมระหว่างมะม่วงหาวมะนาวโห่ Carissa carandas Linn. และพลับ Diospyros kaki L. ต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด ต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี (DPPH และ FRAP) และฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส พบว่าสารสกัดผสมหลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยในกระเพาะอาหารมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าสารสกัดผสมก่อนผ่านการย่อย และหลังผ่านการย่อยในในลำไส้ (20.82±0.90, 16.65±0.32 และ 15.56±0.43 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด) ตามลำดับ สารสกัดผสมก่อนผ่านการย่อย มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ดีกว่าสารสกัดผสมที่ผ่านการย่อยในกระเพาะอาหาร และในลำไส้ โดยมีค่า IC50 = 0.14±0.00, 0.17±0.00 และ 0.22±0.01 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่ทดสอบโดยวิธี FRAP โดยมีค่า FRAP เท่ากับ 374.83±10.23, 337.58±7.06 และ 141.32±0.53 ไมโครโมลของเฟอรัส (II) ต่อกรัมสารสกัด ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าสารสกัดก่อนผ่านการย่อยมีฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสดีที่สุด โดยให้ค่า IC50 = 27.51±0.52 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ผลการทดลองพบว่าสภาวะจำลองระบบการย่อยอาหารมีผลต่อการลดลงของปริมาณสารสำคัญ และฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดผสม

ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate the effect of in vitro simulated gastrointestinal digestion of mixed extract of Karanda (Carissa carandas Linn.) and Persimmon fruits (Diospyros kaki L.) on total phenolic content, antioxidant activities (DPPH and FRAP assay) and α-glucosidase inhibitory activity. It was found that in vitro gastric digestion of a mixed extract contained higher total phenolic content than pre-digestion and intestinal digestion of a mixed extract (20.82±0.90, 16.65±0.32 and 15.56±0.43 mg GAE/g extract), respectively. Mixed extract showed the highest DPPH radical scavenging activity followed by gastric digestion and intestinal digestion of a mixed extract, by giving the IC50 values of 0.14±0.00, 0.17±0.00 and 0.22±0.01 mg/ml, respectively. These 3 samples showed the same trend of antioxidant activity in FRAP assay by giving FRAP values of 374.83±10.23, 337.58±7.06 and 141.32±0.53 μmol of Fe (II)/g extract, respectively. In addition, it was found that pre-digestion of a mixed extract had the highest α-glucosidase inhibitiory activity by giving IC50 value of 27.51±0.52 mg/ml. The results indicated that in vitro simulated gastrointestinal digestion significantly affected the quantity and activity of bioactive compounds of mixed extract.

Key words: *Carissa carandas* Linn. extract, *Diospyros kaki* L. extract, Gastrointestinal Digestion, Antioxidant, DPPH assay, FRAP assay, α-Glucosidase

* Corresponding author; e-mail address: aapuls@ku.ac.th

[1]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การใช้แบบจำลองระบบการย่อยในหลอดทดลอง (*in vitro* simulated digestion models) เป็นการจำลองระบบการย่อยในทางเดินอาหารที่อวัยวะต่างๆ เช่น ปาก กระเพาะอาหาร และลำไส้เล็ก โดยจำลองสภาวะของเหลวต่างๆ ที่อยู่ในอวัยวะภายในร่างกายเกี่ยวกับกระบวนการย่อย เช่น การจำลองของเหลวที่อยู่ในกระเพาะมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH = 2) และที่ลำไส้เล็กมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH = 6.2-6.9) ซึ่งแบบจำลองนี้ได้ถูกนำไปใช้ ในการทดสอบประสิทธิภาพของสารต่างๆ ถึงความเสถียรของสารเมื่อผ่านระบบย่อยอาหาร (digestion stability) ในหลอดทดลอง (รัชฎาพร, 2554) ซึ่งในประเทศไทยมีผลไม้พื้นบ้านที่มีคุณสมบัติที่น่าสนใจรู้จักกันในชื่อมะม่วงหาวมะนาวโห่ หรือ หนามแดง (Karanda) มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Carissa carandas* Linn. จัดอยู่ในวงศ์ Apocyanaceae พบมากในประเทศไทย กัมพูชา เวียดนาม และแอฟริกาใต้ (Singh and Gursimran, 2015) ผลมะม่วงหาวมะนาวโห่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ รวมทั้งสามารถยับยั้งเอนไซม์กลูโคซิเดส เพื่อลดระดับน้ำตาลในเลือดได้ และมีการวิจัยพบว่า C. *carandas* L.Folium และ C. *carandas* L.Cortex มีฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์กลูโคซิเดส ได้ดีกว่าสาร Acarbose ที่ใช้เป็นสารมาตรฐาน (Elya *et al*., 2012) และพลับ (Persimmon) มีถิ่นกำเนิดในประเทศจีน มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Diospyros kaki* L. อยู่ในวงศ์ Ebenaceace ในทางพืชสวน แบ่งพลับออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ พลับฝาด (Astringent) และพลับหวาน (Non-astringent) ปัจจุบันมีการนำพันธุ์พลับเข้ามาปลูกในประเทศไทย มีการปรับปรุงและพัฒนาพื้นที่ปลูกจนเป็นพืชเศรษฐกิจ (โอฬาร, 2544) มีรายงานวิจัยว่าสารสกัดจากพลับที่ปลูกในประเทศไทย มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ รวมทั้งสามารถยับยั้งเอนไซม์กลูโคซิเดส สารสกัดพลับฝาดจากเปลือกและเนื้อพลับพันธุ์ซิชู มีฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์กลูโคซิเดสได้สูงถึงร้อยละ 76.18 และ 71.30 (ลลิตา และคณะ, 2560) ซึ่งผลไม้ทั้ง 2 ชนิด ดังกล่าวมีความน่าสนใจในแง่ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพดี ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของสภาวะจำลองระบบการย่อยในทางเดินอาหารในหลอดทดลองต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสของสารสกัดผสมจากมะม่วงหาวมะนาวโห่และพลับ

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การศึกษาสภาวะจำลองระบบการย่อยในทางเดินอาหารในหลอดทดลอง

1.1 การเตรียมสารสกัดผสมจากมะม่วงหาวมะนาวโห่และพลับ

นำส่วนผลมะม่วงหาวมะนาวโห่จากสวนเกษตรกรจังหวัดสมุทรสงคราม และผลพลับฝาดพันธุ์พี1จากสถานีวิจัยดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้ส่วนผลของผลไม้ทั้ง 2 ชนิด เตรียมตัวอย่างโดยนำเมล็ดผลไม้แต่ละชนิดออก จากนั้นนำส่วนผลที่แกะเมล็ดออกไปอบแห้งและบดละเอียด จากนั้นนำผงของผลไม้แต่ละชนิดมาสกัดด้วยวิธีการสกัดเย็นด้วยตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 70 ในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 โดยแยกสกัดในแต่ละชนิด ทำการสกัดเป็นเวลา 3 วัน และกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 แยกกากออกมาทำการสกัดซ้ำอีก 2 รอบ นำสารละลายที่สกัดได้มาระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยแบบสุญญากาศ (Buchi, Germany) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนได้สารสกัดหยาบที่มีลักษณะข้นหนืด บันทึกน้ำหนักสารและรายงานผลในรูปร้อยละผลผลิต จากนั้นนำสารสกัดทั้งสองผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม คืออัตราส่วนที่ให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพดีที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

1.2 ศึกษาสภาวะจำลองระบบการย่อยในทางเดินอาหารในหลอดทดลอง

การจำลองสภาวะระบบการย่อยในทางเดินอาหารในหลอดทดลอง ทำตามวิธีการของ Wong *et al*. (2014) เตรียมสารสกัดผสมระหว่างมะม่วงหาวมะนาวโห่และพลับ (สารสกัดผสม) ปริมาณ 1 กรัม ผสมกับสาร Gastric juice 10 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พร้อมเขย่าด้วยความเร็ว 95 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งสารที่ได้จากการย่อย ออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

สารส่วนที่ 1 สารสกัดผสมที่ผ่านสภาวะจำลองการย่อยในกระเพาะอาหาร (Gastric digestion) ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 35 นาที เก็บส่วนใสที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

สารส่วนที่ 2 นำส่วนที่เหลือไปย่อยต่อในสภาวะจำลองการย่อยในลำไส้ (Intestinal digestion) โดยปรับค่าความเป็นกรดด่างของส่วนที่ 2 เป็น 6 ด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (0.5 M $NaHCO_3$) จากนั้นเติม Porcine pancreatin (Sigma, USA) และ Bile extract porcine (Sigma, USA) อย่างละปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร และทำการปรับค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 6.9 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ (1 M NaOH) จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ 15 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พร้อมเขย่าด้วยความเร็ว 95 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำไปปั่นเหวี่ยงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 35 นาที เก็บส่วนใสไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้วิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญ และฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดผสม ทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยนำมาคำนวณร้อยละการสูญเสียประสิทธิภาพของสารสกัดผสม (% loss) เมื่อผ่านระบบย่อยในระบบทางเดินอาหาร ดังสมการ

%loss of bioactive compounds of mixed extract =[(A0 – A1) / A0] x 100

โดยที่ A0= สารสกัดผสมก่อนผ่านการย่อย A1 = สารสกัดผสมหลังผ่านการย่อยในลำไส้

2. การวิเคราะหป์ ริมาณสารประกอบฟี นอลิกทงั้ หมด (Total phenolic content)

ทำการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกด้วย Folin-Ciocalteu colorimetric method ที่ดัดแปลงโดย Wolfe *et al.* (2003) โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐานและรายงานผลเป็นมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อหนึ่งกรัมของสารสกัด (mg GAE/g of crude extract)

3. การตรวจสอบความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH และ FRAP

3.1 การตรวจสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ 2, 2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH radical scavenging activity) โดยวิธีของ Zhu *et al.* (2006) เตรียมสารละลาย DPPH ในเอทานอลร้อยละ 95 ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ผสมกับตัวอย่างที่ความเข้มข้น 5 ระดับ เป็นเวลา 30 นาที โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ คำนวณค่า % radical scavenging activity ดังสมการ

% DPPH radical scavenging activity = [(A0 – A1) / A0] x 100

โดยที่ A0 = ค่าการดูดกลืนแสงควบคุม A1 = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

รายงานผลเป็น ค่า IC_{50} มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (mg/ml (คือความเข้มข้นของสารทดสอบที่ทำให้อนุมูลอิสระ DPPH ลดลงร้อยละ 50 และทดสอบเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน BHT, Vitamin C และ -αtocopherol ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2 การตรวจสอบความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออน ด้วย Ferric reducing/antioxidant power (FRAP) assay ตามวิธีของ Kubola and Siriamornpun (2008) โดยใช้ Ferrous sulfate ($FeSo_4.7H_2O$) เป็นสารมาตรฐานและรายงานผลเป็นไมโครโมลเฟอรัส (II)/กรัมสารสกัด (µmol of Fe(II)/g extract)

4. การตรวจสอบฤทธิยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส

ทำการวิเคราะห์ฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส โดยดัดแปลงตามวิธีของ Kazeem *et al.* (2013) และ Feng *et al.* (2014) โดยผสมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ ค่าความเป็นกรดด่าง 6.8 และตัวอย่างสารสกัดผสม เติมเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส 0.05 ยูนิตต่อมิลลิลิตร (Sigma, USA) บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เติม p-nitrophenyl α-D-glucopyranoside (PNP-G) (Sigma, USA) 3 มิลลิโมลาร์ และบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เติมสารละลาย โซเดียมคาร์บอเนต 0.2 โมลาร์ เพื่อหยุด

ปฏิกิริยา นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำค่าที่วัดได้มาคำนวณ %α-Glucosidase inhibition ดังสมการ

α-Glucosidase inhibition (%) = [A-(B– C)/ A] x 100

โดยที่ A = ค่าการดูดกลืนแสงควบคุม (ไม่เติมสารทดสอบ)

B = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (เติม α-Glucosidase)

C = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (ไม่เติม α-Glucosidase)

รายงานผลเป็นค่า IC_{50}) มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) โดยใช้สาร Acarbose เป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบฤทธิ์การยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส

5. การประเมินผลทางสถิติ

การศึกษานี้ได้ออกแบบการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) รายงานผลในรูปค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของการทดลอง 3 ครั้ง และวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และ Ducan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 50 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ปริมาณสารที่สกัดได้จากผลมะม่วงหาวมะนาวโห่และผลพลับ

การสกัดสารจากผลไม้จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ มะม่วงหาวมะนาวโห่และพลับ ด้วยตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 70 โดยวิธีการสกัดเย็น พบว่า ปริมาณสารสกัดจากมะม่วงหาวมีลักษณะเป็นสารเหนียวและมีสีน้ำตาลแดงปริมาณสารสกัดหยาบสูงที่สุด ผลผลิตร้อยละ 55.09 ± 1.93 และสารสกัดพลับมีลักษณะเป็นสารเหนียวมีสีน้ำตาล ผลผลิตร้อยละ 30.53 ± 0.49

2. ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content) ของสารสกัดผสมก่อนผ่านสภาวะจำลองการย่อย (undigested), หลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยในกระเพาะอาหาร (Gastric digested) และในลำไส้ (Intestinal digested) คำนวณได้จาก linear regression equation ของกราฟสารมาตรฐานกรดแกลลิก (Y = 217.21X-15.571, R^2=0.9994) พบว่าปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดผสมหลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยในกระเพาะอาหาร มีค่าเท่ากับ 20.82±0.90 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด ซึ่งสูงกว่าสารสกัดผสมหลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยในลำไส้ และก่อนผ่านสภาวะจำลองการย่อยมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด 15.56±0.43 และ 16.65±0.32 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัดตามลำดับ ดังแสดงใน Table 1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารสกัดผสมที่ผ่านสภาวะจำลองระบบการย่อยในทางเดินอาหาร มีร้อยละการสูญเสียประสิทธิภาพการออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดผสม (% Loss) คิดเป็น 6.53 ที่สูญเสียไปเล็กน้อยระหว่างกระบวนการย่อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ González *et al*. (2018) พบว่าผงพลับที่ผ่านการย่อยในกระเพาะอาหาร มีปริมาณฟีนอลิกสูงกว่าที่สภาวะก่อนผ่านการย่อย และหลังผ่านการย่อยในลำไส้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Qin *et al*. (2018) ทำการศึกษาผลราสเบอร์รี่ ที่ผ่านการย่อยในกระเพาะอาหารพบว่ามีการปลดปล่อยปริมาณสารฟีนอลิกออกมาสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 41.06 เมื่อเปรียบเทียบกับสารก่อนผ่านสภาวะการย่อย และหลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยในลำไส้ มีการปลดปล่อยสารฟีนอลิกลดลง เนื่องจากสารสกัดที่ผ่านการย่อยในกระเพาะอาหารจะถูกย่อยโดยเอนไซม์เปปซิน ในสภาวะพีเอชต่ำ ส่งผลให้เกิดการสลายพันธะที่จับตัวอยู่กับคาร์โบไฮเดรต ทำให้มีการปลดปล่อยสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้น ในขณะที่สภาวะการย่อยในลำไส้มีการปลดปล่อยเอนไซม์ที่สร้างจากเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดในลำไส้ ซึ่งเอนไซม์นี้มีผลในการทำลายสารประกอบฟีนอลิก จึงส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกลดลง

Table 1 The total phenolic content of 3 samples of mixed extract.

Sample	total phenolic content (mg Gallic acid/g of crude extract)
Undigested	16.65 ± 0.32 [b]
Gastric digested	20.82 ± 0.90 [a]
Intestinal digested	15.56 ± 0.43 [c]
% Loss of bioactive compounds	6.53

* Means ± standard deviation (SD) (n = 3). Different letters in the same column indicate significant differences (p < 0.05)

3. **ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน** (DPPH and FRAP radical scavenging activities)

การตรวจสอบคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระในวิจัยนี้ด้วยวิธี DPPH ในการทดสอบโดยรายงานผลเป็นค่า IC_{50} หมายถึง ความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำให้ความเข้มข้นของอนุมูลอิสระลดลงร้อยละ 50 โดยพิจารณาจากค่าที่มีค่าน้อยจะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง ซึ่งพบว่าสารสกัดผสมก่อนผ่านสภาวะจำลองการย่อยมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ดีที่สุด มีค่า IC_{50} = 0.14±0.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร รองลงมาได้แก่ สารสกัดผสมที่ผ่านการย่อยในกระเพาะอาหาร และในลำไส้ มีค่า IC_{50} = 0.17±0.00 และ 0.22±0.01 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งสารสกัดผสมทั้งก่อนและหลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้น้อยกว่าสารมาตรฐาน Vitamin C และ α-Tocopherol แต่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ดีกว่าสารมาตรฐาน BHT ซึ่งผลของสารสกัดผสมหลังผ่านสภาวะจำลองระบบการย่อยในทางเดินอาหารมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ในทิศทางเดียวกันกับความสามารถในการรีดิวซ์ที่ตรวจโดย FRAP ดังแสดงใน Table 2 จากผลการทดลองจะเห็นว่าสารสกัดผสม หลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยทั้งในกระเพาะอาหารและลำไส้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสกัดผสมที่ไม่ผ่านสภาวะการย่อย โดยมีร้อยละการสูญเสียความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ของสารสกัดผสม (% Loss) คิดเป็น 50.72 สูญเสียไประหว่างกระบวนการย่อย เนื่องจากองค์ประกอบของสารถูกทำลายในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดด่างต่ำ ส่งผลให้การกำจัดอนุมูลอิสระมีประสิทธิภาพลดลง (Wong, *et al.*, 2018)

การตรวจสอบสมบัติต้านออกซิเดชันด้วย Ferric Reducing Ability Power (FRAP) assay เป็นการวัดความสามารถรวมในการรีดิวซ์สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก Fe3+-TPTZ (ferric tripyridyl triazine) ไปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเหล็ก Fe^{2+} -TPTZ (Ferrous tripyridyl triazine) โดยสารที่มีสมบัติในการต้านการเกิดออกซิเดชัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำเงิน รายงานผลเป็นค่า FRAP value (ไมโครโมลของเฟอรัส (II) ต่อกรัมสารสกัด) ค่าที่มีค่ามากแสดงว่ามีสมบัติในการต้านออกซิเดชันสูง ซึ่งพบว่าสารสกัดผสมก่อนผ่านสภาวะจำลองการย่อยมีค่า FRAP สูงสุด เท่ากับ 374.83±10.23 ไมโครโมลของเฟอรัส (II) ต่อกรัมสารสกัด รองลงมาคือสารสกัดผสมเมื่อผ่านสภาวะการย่อยในกระเพาะอาหารและ ในลำไส้ มีค่า FRAP เท่ากับ 337.58±7.06 และ 141.32±0.53 ไมโครโมลของเฟอรัส (II) ต่อกรัมสารสกัด ตามลำดับ โดยหลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยในทางเดินอาหารแล้ว สารสกัดผสมมีร้อยละการสูญเสีย (% Loss) คิดเป็นร้อยละ 62.30 ที่สูญเสียไประหว่างกระบวนการย่อย แต่สารสกัดผสมทั้งก่อนและหลังการผ่านสภาวะจำลองการย่อยในทางเดินอาหารมีค่า FRAP น้อยกว่าสารมาตรฐาน Vitamin C, α-Tocopherol และ BHT ดังแสดงใน Table 2

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารสกัดผสมที่วัดโดยวิธี FRAP และ DPPH นั้นมีค่าไปในทิศทางเดียวกัน คือสารสกัดผสม หลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยทั้งในกระเพาะอาหารและลำไส้มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสกัดผสมที่ไม่ผ่านสภาวะการย่อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kasipandi *et al.* (2019) ได้ศึกษาผลของการจำลองสภาวะการย่อยในระบบทางเดินอาหารต่อ

ความสามารถในการต้านออกซิเดชันวัดโดยวิธี DPPH และ FRAP ของพอลิแซ็กคาร์ไรด์จากผล *Opilia amentacea* roxb (OAFP) พบว่ามีความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่ทดสอบด้วยวิธี DPPH และ FRAP ไปในทิศทางเดียวกัน คือสารสกัดผสมที่สภาวะก่อนการย่อย มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันในทั้ง 2 วิธีดีที่สุด และลดลงเมื่อผ่านสภาวะการย่อยที่กระเพาะอาหาร และลำไส้ ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัย ของ Chait *et al.* ((2019) ซึ่งพบว่าสารฟีนอลิกชนิด Soluble Conjugated และ Bond เมื่อผ่านสภาวะจำลองการย่อยในกระเพาะอาหาร และในลำไส้ จะมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันลดลง เพราะหลังจากที่สารผ่านสภาวะจำลองระบบการย่อย สารจะมีขั้วมากขึ้น ทำให้ยากต่อการเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ ส่งผลให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลง (Wong *et al.*, 2018)

Table 2 Antioxidant activities by DPPH and FRAP assay of 3 samples of mixed extract.

Sample	DPPH assay IC_{50} (mg/ml)	FRAP assay (µmol of Fe(II)/g extract)
Undigested	0.14 ± 0.00 ^{d}	374.83 ± 10.23 ^{d}
Gastric digested	0.17 ± 0.00 ^{c}	337.58 ± 7.06 ^{d}
Intestinal digested	0.22 ± 0.01 ^{b}	141.32 ± 0.53 ^{e}
% Loss of bioactive compounds	50.72	62.30
Vitamin C	0.005± 0.00 ^{e}	12,071.47 ± 145.39 ^{a}
α-Tocopherol	0.01 ± 0.00 ^{e}	5,191.78 ± 36.35^{b}
BHT	0.23 ± 0.00 ^{a}	2,921.83 ± 50.41 ^{c}

* Means ± standard deviation (SD) (n = 3). Different letters in the same column indicate significant differences (p<0.05).

4.สมบัติการยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส

คุณสมบัติการยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส โดยการติดตามปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ของสารตั้งต้น *p*-nitrophenyl-α-*D*-glucopyranoside (PNP-G) ซึ่งเป็นสารละลายไม่มีสี เมื่อมีเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส PNP-G จะถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็น *p*-nitrophenol ซึ่งเป็นสารละลายใสสีเหลือง ในกรณีที่สารทดสอบมีฤทธิ์ในการยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสสารละลายสีเหลืองจะจางลง ตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี การยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส จะรบกวนกระบวนการย่อยแป้งและคาร์โบไฮเดรต ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นน้ำตาลโมกุลเดี่ยวเช่น กลูโคส ส่งผลให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมน้ำตาลได้ เป็นการลดระดับน้ำตาลในร่างกายทางอ้อมหรือชั่วคราว ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้วัดความสามารถในการลดระดับน้ำตาลทางอ้อมของสารสกัดต่างๆ

จากผลการตรวจสอบฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสต่อสภาวะจำลองการย่อยในทางเดินในหลอดทดลอง และการทดลองรายงานผลเป็นค่า IC_{50} โดยพิจารณาจากค่าที่มีค่าน้อยจะมีความสามารถยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสได้ดี พบว่าสารสกัดผสมก่อนผ่านสภาวะจำลองระบบการย่อย มีฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสได้ดีที่สุด มีค่า IC_{50} = 27.51±0.52 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร รองลงมาได้แก่ สารสกัดผสมที่ผ่านสภาวะจำลองการย่อยในลำไส้ และในกระเพาะอาหาร มีค่า IC_{50} = 36.19±0.55 และ 68.23±1.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และพบว่าสารสกัดผสมทั้งก่อนและหลังผ่านสภาวะจำลองระบบการย่อยในทางเดินอาหาร มีความสามารถยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสได้ดีน้อยกว่าสารมาตรฐาน Acarbose ซึ่งเป็นตัวยาที่ใช้ในการรักษาโรคเบาหวานชนิดที่ 2 จะเห็นว่าสารสกัดผสมเมื่อผ่านสภาวะจำลองการย่อยทั้งในกระเพาะอาหารและในลำไส้นั้นทำให้ฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงใน Table 3 เมื่อเปรียบเทียบกับสกัดผสมที่ไม่ผ่านสภาวะการย่อย โดยมีร้อยละการสูญเสีย (% Loss) ของสารสกัดผสมร้อยละ 31.55 หลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยในทางเดินอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qin *et al.* (2018) ที่ศึกษาผงเมล็ด

ราสเบอร์รี่แห้ง (raspberry dried seeds)ในสภาวะจำลองการย่อยในระบบทางเดินอาหารต่อฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส พบว่าผงเมล็ดราสเบอร์รี่แห้งเมื่อผ่านสภาวะจำลองในกระเพาะอาหารมีฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสลดลงเมื่อเทียบกับสารที่ไม่ผ่านสภาวะจำลองการย่อย และมีฤทธิ์ดีขึ้นหลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยในลำไส้แต่มีฤทธิ์ดีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสารไม่ผ่านสภาวะจำลองการย่อย

Table 3 Alpha glucosidase inhibitory activity of 3 samples of mixed extract.

Sample	Alpha glucosidase Inhibitory activity IC_{50} (mg/ml)
Undigested	27.51± 0.52[c]
Gastric digested	68.23 ± 1.02 [a]
Intestinal digested	36.19 ± 0.55 [b]
%Loss of bioactive compounds	31.55
Acarbose	16.32 ± 0.30 [d]

* Means ± standard deviation (SD) (n=3). Different letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

สรุป

สารสกัดผสมที่ผ่านสภาวะจำลองการย่อยในระบบทางเดินอาหาร ส่งผลต่อปริมาณสารฟีนอลิกเพิ่มขึ้นหลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยในกระเพาะ และลดลง เมื่อผ่านการย่อยในลำไส้สูญเสียไประหว่างการย่อยเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 6.53 เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดผสมก่อนผ่านการย่อย ความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH และ FRAP ของสารสกัดผสมเมื่อผ่านสภาวะจำลองการย่อยในกระเพาะและในลำไส้ลดลง เมื่อเทียบกับสารสกัดผสมก่อนผ่านสภาวะจำลองการย่อย เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพของสารไประหว่างการย่อย คิดเป็นร้อยละ 50.72 และ 62.30 ตามลำดับ สารสกัดผสมก่อนผ่านสภาวะจำลองการย่อยมีฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดสดีที่สุดและหลังผ่านการย่อยในกระเพาะอาหารมีฤทธิ์ลดลง และเพิ่มขึ้นหลังผ่านการย่อยในลำไส้ เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพของสารไประหว่างการย่อยเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 31.55 สารสกัดผสมระหว่างมะม่วงหาวมะนาวโห่และพลับหลังผ่านสภาวะการย่อยในทางเดินอาหารยังคงมีความสามารถในการต้านออกซิเดชัน และฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส คงเหลืออยู่ร้อยละ 37.70 และ 68.45 ตามลำดับ มีปริมาณฟีนอลิกคงเหลือหลังผ่านสภาวะจำลองการย่อยในทางเดินอาหารร้อยละ 93.47

กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในการสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

รัชฎาพร อุ่นศิวิไลย์. 2554. ชีวภาพพร้อมใช้และการนำไปใช้ทางชีวภาพของสารสกัดรางจืด. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 40 หน้า

ลลิตา คชารัตน์, อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ, ประภัสสร รักถาวร, เกสรี กลิ่นสุคนธ์ และวีระศรี เฆมตรง. 2560. **ผลของระยะเวลาเก็บเกี่ยวต่อสารพฤกษเคมี และฤทธิ์ทาง ชีวภาพของพลับฝาด**)*Diospyros kaki*). การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55. สาขาอุตสาหกรรมเกษตร. ระหว่างวันที่ 31 มกราคม ถึง 3 กุมภาพันธ์ 2560 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

โอฬาร ตัณฑวิรุฬห์. 2544. **การผลิตพลับในประเทศไทย.** สถาบันค้นคว้าและพัฒนาระบบเกษตรในเขตวิกฤต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. โรงพิมพ์ชนารักษ์. กรุงเทพฯ. 35หน้า.

Cassani L., E. Gerbino, M. I R. Moreira and A.G.-Zavaglia. 2018. Influence of non-thermal processing and storage conditions on the release of health-related compounds after *in vitro* gastrointestinal digestion of fiber-enriched strawberry juices. **Functional Foods**. 40: 128-136

Elya B., K. Basah, A. Mun'im, W. Yuliastuti, A. Bangun and E. K. Septiana. 2012. Screening of α-glucosidase inhibitory activity from some plants of Apocynaceae, Clusiaceae, Euphorbiaceae, and Rubiaceae. **Journal of Biomedicine and Biotechnology.** 2012(1): 281078.

Feng Y, D. Franceschi G, A. Kahraman, M. Soste, A. Melnik, P. J. Boersema, P. P. de Laureto, Y. Nikolaev, A. P. Oliveira and P. Picotti. 2014. Global analysis of protein structural changes in complex proteomes. **Nature Biotechnology**. 32(10): 1036-44.

González R. L., M. V.-Martos, J. A. P. Álvarez and J. F.-López. 2018. Changes in bioaccessibility, polyphenol profile and antioxidant potential of flours obtained from persimmon fruit (*Diospyros kaki*) co-products during *in vitro* gastrointestinal digestion. **Food Chemistry**. 256: 252-258.

Kasipandi M., A. Manikandan, P. S. Sreeja, T. Suman, S. Saikumar, S. Dhivya and T. Parimelazhagan. 2019. Effects of *in vitro* simulated gastrointestinal digest α - glucosidase and α - amylase inhibitory activities polysaccharides from *Opilia amentacea* roxb fruit. **Food Science and Technology.** 111: 774-781

Kazeem M. I., J. O. Adamson and I. A. Ogunwande. 2013. Modes of inhibition of α-amylase and α-glucosidase by aqueous extract of *Morinda lucida* Benth Leaf. **BioMed Research International**. 2013: 527-270

Kubola, J. and S.Siriamornpun. 2008. Phenolic contents and antioxidant activities of bitter gourd (*Momordica charantia* L.) leaf, stem and fruit fraction extracts *in vitro*. **Food Chemistry**. 110: 881–890.

Qin Y., L.Wang, Y. Liu, Q. Zhang, Y. Li and Z. Wu. 2018. Release of phenolic compounds from *Rubis idaeus* L. dried fruits and seeds during simulated *in vitro* digestion and their bio-activitys. **Journal of Functional Foods**. 46: 57-65

Singh A. and K.U. Gursimran. 2015. A review on *Carissa carandas* L. phytochemistry, ethno-pharmacology, and micropropagation as conservation strategy. **Asian journal of Pharmaceutical and Clinical research.** 8(3): 26-30.

Wolfe, K., X. Wu and R. H. Liu. 2003. Antioxidant activity of apple peels. **Agricultural and Food Chemistry.** 51: 609-614.

Wong Y. h., C. P. Tan, K. Long and K. L. Nyam. 2014. *In vitro* simulated digestion on the biostability of *Hibiscus cannabinus* L. seed extract. **Food Science**. 32: 177-181.

Wang, C., W. Li, Z. Chen, X. Gao, G. Yuan and Y. Pan et al. 2018. Effects of simulated gastrointestinal digestion *in vitro* on the chemical properties, antioxidant activity, α-amylase and α-glucosidase inhibitory activity of polysaccharides from *Inonotus obliquus*. **Food Research International.** 103: 280–288.

Zhu K., H. Zhou and H. Qian. 2006. Antioxidant and free radical-scavenging activities of wheat germ protein hydrolysates (WGPH) prepared with alcalase. **Process Biochemistry**. 4: 1296–1302.

การปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในธัญพืช

Occurrence of Ochratoxin A in Cereal

<u>ฐิตาภรณ์ รัดริน</u>[*1] อดิศร เจตนะจิตร[1] รัชนี รักษ์สัตยานันท์ [1]กนกวรรณ พลฉิม [1]และ ทวีศักดิ์ ทองงามดี[1]

<u>Thitaporn Rutrin</u> ,[*1]Adisorn Jettanajit ,[1]Ratchanee Ragsattayanan[1],

Kanokwan Ponchim[1] and Taweesak Tongngamdee[1]

บทคัดย่อ

โอคราทอกซินเอเป็นสารพิษจากเชื้อราและถูกจัดเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ดังนั้นการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในธัญพืชจึงทำให้เกิดปัญหาสุขภาพแก่ผู้บริโภคและผลเสียทางเศรษฐกิจ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสำรวจข้อมูลการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในธัญพืชของประเทศไทย โดยใช้วิธีตรวจสอบปริมาณโอคราทอกซินเอดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน AOAC (2016) 2000.03 ใช้เทคนิค High Performance Liquid Chromatography - High Resolution Mass Spectrometry (HPLC-HRMS) จากการตรวจสอบปริมาณโอคราทอกซินเอในธัญพืชจากสินค้าในประเทศและสินค้านำเข้า จำนวน 231 ตัวอย่างในระหว่างปี 2559-2561 พบการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอทั้งหมด 13 ตัวอย่าง (ร้อยละ 5.6) และมีจำนวน 4 ตัวอย่าง (ร้อยละ 1.7) ที่มีปริมาณโอคราทอกซินเอเกินมาตรฐานสหภาพยุโรป (>5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) ได้แก่ จมูกข้าว 2 ตัวอย่าง (13.39 และ 44.96 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)ข้าวกล้อง 1 ตัวอย่าง (7.10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และข้าวสาลี 1 ตัวอย่าง (5.78 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)

ABSTRACT

Ochratoxin A is mycotoxin and classified as carcinogen. Therefore, contamination of ochratoxin A in cereals causes consumer health issues and loss of economy. The objective of this study was to investigate the occurrence and levels of ochratoxin A in cereals of Thailand. The ochratoxin A analysis using high performance liquid chromatography - high resolution mass spectrometry (HPLC-HRMS) was modified from AOAC (2016) 2000.03. Two hundred and thirty one samples domestic products and import products between year 2016-2018 were analyzed for ochratoxin A. It was found that 13 samples (5.6%) contaminated with ochratoxin A and 4 samples (1.7%) exceeded maximum limit of the European Union (>5 µg/kg), which were 2 samples of rice germ (13.39 and 44.96 µg/kg), 1 sample of brown rice (7.10 µg/kg) and 1 sample of wheat (5.78 µg/kg).

Key words: Ochratoxin A, Cereal, HPLC-HRMS

* Corresponding author; e-mail address: **rutrin@hotmail.com**

[1]กองพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าพืช กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

[1]Plant Standard and Certification Division, Department of Agriculture, Bangkok 10900

คำนำ

การปนเปื้อนของสารพิษจากเชื้อราในธัญพืชมักเกิดขึ้นหลังจากการเก็บเกี่ยว หากการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หลังเก็บเกี่ยวไม่เหมาะสม ทำให้ผลผลิตมีความชื้นสูงซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมทำให้เชื้อราผลิตสารพิษได้ (Lund and Frisvad, 2003) สารพิษจากเชื้อรานั้นเกิดจากขบวนการเมตาบอลิซึมขั้นทุติยภูมิ (Secondary metabolites) ของเชื้อราโดยสารพิษจากเชื้อราที่พบการปนเปื้อนในธรรมชาติมีหลายชนิด เช่น อะฟลาทอกซิน (Aflatoxin) ฟูมูนิซิน (Fumunisin) ดิออกซินีวาลีนอล (Deoxynivalenol) และโอคราทอกซินเอ (Ochratoxin A) เป็นต้น โอคราทอกซินเอ (Ochratoxin A) เป็นสารพิษที่ผลิตจากเชื้อรากลุ่ม *Aspergillus และ Penicillium* มีสายพันธุ์หลักที่ผลิตโอคราทอกซินเอคือ *Penicillium verrucosum, Aspergillus ochraceus* และ *Aspergillus carbonarius* (World Health Organization, 2008) และจัดเป็นสารพิษในกลุ่ม 2B เป็นสารก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (International Agency for Research on Cancer, 1993) นอกจากนี้ยังเป็นพิษต่อไต ระบบประสาทและระบบภูมิคุ้มกันอีกด้วย (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 2008) การปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอนั้นนอกจากก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของผู้บริโภค ยังมีผลเสียทางเศรษฐกิจด้วย เนื่องจากหากมีการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในสินค้าเกินมาตรฐานที่กำหนด สินค้าที่ปนเปื้อนจะถูกทำลายหรือถูกปฏิเสธจากลูกค้า ซึ่ง Codex Alimentarius ได้กำหนดมาตรฐานปริมาณโอคราทอกซินเอสูงสุดที่สามารถพบได้ในข้าวสาลี ข้าวไรย์และข้าวบาร์เลย์ไม่เกิน 5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (Codex Alimentarius, 1995) เช่นเดียวกับสหภาพยุโรปได้มีการกำหนดมาตรฐานปริมาณสูงสุดของโอคราทอกซินเอที่สามารถพบได้ในธัญพืชที่ไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปมีค่าไม่เกิน 5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (European Commision, 2006)

จากการสำรวจการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในธัญพืชพบว่ามีการปนเปื้อนเกิน 5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมในหลายประเทศ (World Health Organization, 2008) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gonza´lez *et al.* (2006) พบการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในข้าวและข้าวอินทรีย์ในประเทศสเปนมีปริมาณโอคราทอกซินเอปนเปื้อนอยู่ในช่วง 1.0-27.3 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมและ Iqbal *et al.* (2016) พบการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในตัวอย่างข้าวที่สุ่มเก็บในประเทศปากีสถานมีปริมาณโอคราทอกซินเอเกินมาตรฐานสหภาพยุโรป (>5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) 14% เช่นเดียวกับการพบการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอใน Breakfast cereal ในประเทศปากีสถานมีปริมาณโอคราทอกซินเอเกินมาตรฐานสหภาพยุโรป (Iqbal *et al.*, 2014) นอกจากนี้พบการแจ้งเตือน Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF) เรื่องการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในธัญพืชและผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ในระหว่างปี 2013 ถึง 2018 จำนวน 41 ครั้ง (European Commission, 2018)

ผู้วิจัยได้ตระหนักถึงการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในธัญพืชในประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสำรวจข้อมูลการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในธัญพืชในประเทศ โดยใช้วิธีตรวจสอบปริมาณโอคราทอกซินเอในธัญพืชตามวิธีตรวจสอบปริมาณโอคราทอกซินเอดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน AOAC (2016) 2000.03 (Latimer, 2016) ใช้เทคนิค High Performance Liquid Chromatography - High Resolution Mass Spectrometry (HPLC-HRMS) เพื่อเป็นการสำรวจข้อมูลการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในธัญพืชในประเทศไทยและรวบรวมเป็นข้อมูลพื้นฐานด้านความปลอดภัย

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีและวัสดุทดลอง

สารมาตรฐานโอคราทอกซินเอจากบริษัท Supelco จำกัด (ประเทศสหรัฐอเมริกา) acetonitrile (HPLC grade และ AR grade) methanol (HPLC grade และ AR grade) และ formic acid (AR grade) จากบริษัท Fisher Chemical จำกัด (ประเทศสหราชอาณาจักร) phosphate buffered saline (PBS) จากบริษัท Vicam จำกัด (ประเทศสหรัฐอเมริกา) immunoaffinity column (OchaTest) จากบริษัท Vicamจำกัด (ประเทศสหรัฐอเมริกา)

ตัวอย่างธัญพืช

สุ่มเก็บตัวอย่างธัญพืชในระหว่างปี 2559-2561 ได้แก่ ข้าว ข้าวสาลี ข้าวญี่ปุ่น ข้าวบาสมาติ ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวไรน์ จำนวน 231 ตัวอย่าง ประกอบด้วยตัวอย่างสินค้าที่ผลิตในประเทศไทยจากแหล่งจำหน่ายและผลิต จำนวน 1 92ตัวอย่าง และตัวอย่างนำเข้าจำนวน 39 ตัวอย่าง สุ่มตัวอย่างธัญพืชที่บรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิทปริมาณอย่างน้อย 1 กิโลกรัมต่อตัวอย่าง

นำตัวอย่างผสมรวมกันทั้งหมด บดหยาบด้วยเครื่องบดตัวอย่าง รุ่น RAS®Mill ยี่ห้อ ROMER® 1 รอบ แล้วให้นำไปบดด้วยเครื่องบดตัวอย่าง รุ่น CYCLOTEC 1093Sample mill ยี่ห้อ Tecator จนตัวอย่างละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันและเก็บในถุงพลาสติกปิดสนิทในที่อุณหภูมิต่ำกว่า -20°C

การเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบโอคราทอกซินเอในธัญพืช

ชั่งตัวอย่างธัญพืชบดละเอียด 50 กรัม เติมสารละลาย acetonitrile-water (6:4, v/v) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่า flask ชนิด wrist action shaker เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 และปิเปตสารละลายที่กรองได้ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงใน erlenmeyer flask และเติมสารละลาย phosphate buffered solution (PBS) ปริมาตร 40 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันหากสารละลายที่กรองได้เป็นสารละลายขุ่นให้กรองอีกครั้งด้วยกระดาษกรองใยแก้ว

นำส่วนที่กรองได้ไปกำจัดสารรบกวนด้วย immunoaffinity column (IAC) โดยใช้สารละลายที่สกัดปริมาตร 10 มิลลิลิตร ผ่าน IAC อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที ล้าง IAC ด้วยสารละลาย PBS ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และน้ำ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นทำให้ column แห้ง

ชะโอคราทอกซินเอออกจาก IAC โดยใช้ m ethanolปริมาตร 1มิลลิลิตร จำนวน 4 ครั้งใส่ในขวดสีชาขนาด 8 มิลลิลิตร นำสารที่ได้ไประเหยจนแห้งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนละลายส่วนที่เหลือด้วยสารละลาย acetonitrile-water (1:1, v/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าด้วยวอร์เทกซ์เป็นเวลา 30 วินาที กรองผ่านไซริงก์ฟิลเตอร์ชนิด nylon ขนาด 0.22 ไมโครเมตร ใส่ HPLC vial และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-HRMS ต่อไป

ภาวะของเครื่อง HPLC-HRMS

การวิเคราะห์ปริมาณโอคราทอกซินเอโดยด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography - High Resolution Mass spectrometry (HPLC-HRMS) (HPLC รุ่น Ultimate-3000 จากบริษัท Thermo Fisher Scientific จำกัดและ Mass spectrometry รุ่น maXis II จากบริษัท Bruker จำกัด) ใช้ชนิด D etectorเป็น Mass spectrometer : Electrospray ionization (ESI) / Time-of-Flight mass analyzer (TOF) โดยใช้คอลัมน์ HPLC

column รุ่น Acclaim^{TM} RSLC 120 C 18ยาว 100 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2. 1มิลลิเมตร ขนาด2.2 ไมโครเมตร (บริษัท Thermo Fisher Scientific จำกัด) โดยใช้เฟสเคลื่อนที่เป็น 0.1% formic acid ในน้ำและ acetonitrile อัตราส่วน 30 ต่อ 70 อัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่เป็น 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้ปริมาตรสารตัวอย่าง 5 ไมโครลิตร ระยะเวลาในการวิเคราะห์ 5 นาที

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาโอคราทอกซินเอในธัญพืชอ้างอิงตาม EURACHEM Guide (Magnusson and Örnemark, 2014), AOAC (Latimer, 2016) และ SANTE/11813/2017 (European Commission, 2017) พบว่ามีช่วงความสามารถในการทดสอบ (Working Range) คือ 0.50-20 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of Detection) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation) มีค่าเท่ากับ 0.20 และ 0.50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ความแม่น (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของปริมาณที่วิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ยอมรับ (%Recovery 72.54-116.60, %RSD 13.10-13.69)

การปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในธัญพืช

การตรวจสอบปริมาณโอคราทอกซินเอในธัญพืชได้แก่ ข้าว ข้าวสาลี ข้าวบาสมาติ ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวไรน์ทั้งหมดจำนวน 231 ตัวอย่าง ทดสอบหาปริมาณโอคราทอกซินเอในธัญพืชดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน AOAC (2016) 2000.03 โดยใช้เครื่อง HPLC-HRMS (Table 1) พบการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในตัวอย่างที่สุ่มเก็บทั้งหมด 13 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 5.6 ของตัวอย่างที่สุ่มเก็บทั้งหมดเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานสหภาพยุโรป (ปริมาณสูงสุดของโอคราทอกซินเอในธัญพืชไม่เกิน 5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) พบว่ามี 4 ตัวอย่างที่มีค่าเกิน 5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมคิดเป็นร้อยละ 1.7ของตัวอย่างที่สุ่มเก็บทั้งหมด

Table 1 Overall ochratoxin A (OTA) contamination in cereal.

Source	No. of sample	No. of negative sample* (%)	No. of OTA contamination sample (%)	
			≤5 μg/kg	>5 μg/kg
Domestic product	192	183 (95.3)	6 (3.1)	3 (1.6)
Import product	39	35 (89.7)	3 (7.7)	1 (2.6)
Total	231	218 (94.4)	9 (3.9)	4 (1.7)

Note: *negative sample= below the measurable detection limit of 0.20 μg/kg

เมื่อพิจารณาการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอของตัวอย่างข้าวจากแหล่งผลิตและจำหน่ายภายในประเทศ (Table 2) พบว่ามีการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในตัวอย่างข้าวหอมมะลิ ข้าวกล้องและจมูกข้าว โดยตัวอย่างจมูกข้าวมีปริมาณการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอสูงที่สุด รองลงมาเป็นข้าวกล้องข้าวหอมมะลิ ตามลำดับในตัวอย่างข้าวหอมมะลิพบการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอ จำนวน 2 ตัวอย่างและทุกตัวอย่างมีค่าน้อยกว่า 0.50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งไม่เกินมาตรฐานสหภาพยุโรป (>5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และไม่พบการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในข้าวขาว ข้าวเหนียวและปลายข้าวเนื่องจากในกระบวนการผลิตของข้าวสาร

ตั้งแต่ทำความสะอาด กะเทาะเปลือกเพื่อแยกรำออก ขัดสีเพื่อนำจมูกข้าวออก สามารถลดการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอได้ประมาณ 75% (Scudamore *et al.*, 2003) ทำให้มีความเสี่ยงต่ำที่จะพบการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในตัวอย่างข้าวหอมมะลิ ข้าวขาวข้าวเหนียวและปลายข้าว

เมื่อพิจารณาปริมาณโอคราทอกซินเอในตัวอย่างจมูกข้าวที่สุ่มเก็บทั้งหมด 5 ตัวอย่าง พบการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอ 2 ตัวอย่าง มีค่า 13.39 และ 44.96 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอที่เกินค่ามาตรฐานสหภาพยุโรป (>5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และพบการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในข้าวกล้อง จำนวน 5 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 30 ตัวอย่าง โดยมี 4 ตัวอย่างที่มีปริมาณโอคราทอกซินเอน้อยกว่า 0.50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และมี 1 ตัวอย่างที่มีปริมาณโอคราทอกซินเอเท่ากับ 7.10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเกินมาตรฐานสหภาพยุโรป การปนเปื้อนทั้งในตัวอย่างจมูกข้าวและข้าวกล้องมีค่าที่เกินมาตรฐานนี้ อาจมีสาเหตุมาจากการปนเปื้อนของของสารพิษจากเชื้อราในระหว่างหลังการเก็บเกี่ยว (Lund and Frisvad, 2003) นอกจากนี้ Medina *et al.* (2004) พบว่าปริมาณโปรตีนสูงในตัวอย่างธัญพืชมีความสัมพันธ์กับปริมาณโอคราทอกซินเอที่เพิ่มขึ้น เพราะหากมีปริมาณโปรตีนสูงก็จะมีกรดอะมิโนที่จำเป็นสูง จึงเป็น Substrate ที่ดีทำให้ *Aspergillus ochraceus* สร้างโอคราทอกซินเอได้เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Gonza´lez *et al.* (2006) ที่พบว่า Wild rice ที่มีปริมาณโปรตีนสูงกว่า White rice จึงมีการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอสูงกว่า White rice ด้วย

Table 2 Occurrence of ochratoxin A in various types of rice samples in domestic products.

Type	No. of sample	No. of negative sample* (%)	No. of OTA contamination sample (%)	
			5≥ µg/kg	>5 µg/kg
Jasmine rice	81	79 (97.5)	2 (2.5)	-
White rice	69	69 (100)	-	-
Brown rice	30	25 (83.4)	4 (13.3)	1 (3.3)
Rice germ	5	3 (60.0)	-	2 (40.0)
Glutinous rice	4	4 (100)	-	-
Broken rice	3	3 (100)	-	-

Note: *negative sample= below the measurable detection limit of 0.20 µg/kg

เมื่อพิจารณาการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในตัวอย่างสินค้านำเข้าที่สุ่มเก็บจำนวน 39 ตัวอย่าง (Table 3) พบการปนเปื้อนในธัญพืชทั้งหมด 4 ตัวอย่าง มีเพียง 1 ตัวอย่างที่มีปริมาณโอคราทอกซินเอเกินมาตรฐานสหภาพยุโรป (>5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) เมื่อพิจารณาตามชนิดของธัญพืชในตัวอย่างสินค้านำเข้า ไม่พบการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในตัวอย่างข้าวญี่ปุ่น ข้าวไรน์ ข้าวบาร์เลย์ และข้าวโอ๊ต แต่พบการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในตัวอย่างข้าวบาสมาติ และข้าวสาลี โดยปริมาณโอคราทอกซินเอที่พบในตัวอย่างข้าวบาสมาติมีค่า 1.24 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานสหภาพยุโรป และการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในตัวอย่างข้าวสาลีพบการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ปริมาณที่พบเป็น 0.64, 2.44 และ 5.78 ไมโครกรัมต่อ

กิโลกรัม มีเพียง 1 ตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอเกินค่ามาตรฐานสหภาพยุโรป (>5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และเมื่อพิจารณาถึงประเทศต้นทางของข้าวสาลี พบว่าข้าวสาลีนำเข้าจากประเทศออสเตรเลียและประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นประเทศที่อยู่ในเขตอบอุ่น (Temperate Zone) ซึ่งมีความเสี่ยงในการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอ หากการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวไม่ดี ทำให้ความชื้นในธัญพืชสูง จะทำให้เชื้อรา *Penicillium verrucosum* เจริญและสร้างโอคราทอกซินได้ (Santos *et al.*, 2010)

Table 3 Occurrence of ochratoxin A in various types of cereal samples in import products.

Type	Country of origin	No. of sample	No. of negative sample* (%)	No. of OTA contamination sample(%)	
				≤5 μg/kg	>5 μg/kg
Wheat	Australia USA	20	17 (85.0)	2 (10.0)	1 (5.0)
Japonica rice	Australia Japan Vietnam	8	8 (100)	-	-
Basmati rice	India Pakistan	6	5 (83.3)	1 (16.7)	-
Rye	Australia	2	2 (100)	-	-
Barley	Australia Netherlands	2	2 (100)	-	-
Oat	USA	1	1 (100)	-	-

Note: *negative sample= below the measurable detection limit of 0.20 μg/kg

จากการตรวจสอบปริมาณโอคราทอกซินเอในธัญพืชทั้งหมดพบการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในสินค้าภายในประเทศ 3 ตัวอย่าง (จมูกข้าว 2 ตัวอย่าง และข้าวกล้อง 1 ตัวอย่าง) และสินค้านำเข้า 1 ตัวอย่าง (ข้าวสาลี) เกินมาตรฐานสหภาพยุโรป (> 5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งถือว่าเป็นสินค้าที่มีความเสี่ยงให้เกิดปัญหาสุขภาพของผู้บริโภคอาจจำเป็นต้องติดตามสุ่มเก็บตัวอย่างเฝ้าระวัง และเพื่อหาข้อมูลเพิ่มต่อไป และกำหนดแนวทางการป้องกันการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในสินค้ากลุ่มธัญพืช ในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานโอคราทอกซินเอในธัญพืช ทำให้ยังไม่สามารถบังคับใช้กฎหมายเพื่อกำจัดสินค้าที่ปนเปื้อนโอคราทอกซินเอจากตลาดได้

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การตรวจสอบปริมาณโอคราทอกซินเอในธัญพืชในสินค้าที่จำหน่าย ผลิตและนำเข้ามาบริโภคในประเทศจำนวน 231 ตัวอย่าง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานด้านความปลอดภัย พบว่ามีการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอในสินค้าจำนวน 13 ตัวอย่างและมีเพียง 4 ตัวอย่างที่มีปริมาณโอคราทอกซินเอเกินมาตรฐานสหภาพยุโรป (>5 ไมโครกรัม

ต่อกิโลกรัม) ได้แก่ จมูกข้าว 2 ตัวอย่าง (13.39 และ 44.96 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) ข้าวกล้อง 1 ตัวอย่าง (7.10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) และข้าวสาลี 1 ตัวอย่าง (5.78 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) หากผู้บริโภคบริโภคธัญพืชที่มีการปนเปื้อนโอคราทอกซินเอเกินมาตรฐานสหภาพยุโรป (>5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) อาจทำให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพในอนาคตได้ ปัจจุบันประเทศไทยไม่มีกฎหมายกำหนดเรื่องปริมาณโอคราทอกซินเอในที่ปนเปื้อนในธัญพืช ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ใช้เป็นข้อมูลด้านความปลอดภัยในการดำเนินการพิจารณากำหนดมาตรฐานปริมาณสูงสุดในการปนเปื้อนของโอคราทอกซินเอในธัญพืชต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี 2 กลุ่มพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพสินค้า กองพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าพืช กรมวิชาการเกษตร และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Codex Alimentarius. 1995. **Codex General Standard for Contaminants and Toxin in Food and Feed (CODEX STAN 193-1995)** 41p.

European Commission. 2006. COMMISSION REGULATION (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. **Official Journal of the European Union** 364: 5-24.

European Commission. 2017. **Guidance document on analytical quality control and method validation procedures for pesticide residues and analysis in food and feed SANTE/11813/2017** Implemented by 1/1/2018

European Commission. 2018. **RASFF Portal** Available Source: https://webgate.ec.europa.eu /rasff-window/portal/, December 31, 2018. Search criteria: Subject “OCHRATOXIN”, Product type “food”, Hazard category “mycotoxins” Product category “cereals and bakery product, Notified between “1/1/2013” and “31/12/2018”

Gonza´lez, L., C. Juan, J.M. Soriano, J.C. Molto and J. Man˜es. 2006. Occurrence and daily intake of ochratoxin A of organic and non-organic rice and rice products. **International Journal of Food Microbiology** 107: 223-227

International Agency for Research on Cancer. 1993. **IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Some Naturally Occurring Substances: Food Items and Constituents, Heterocyclic Aromatic Amines and Mycotoxins** 56: 489-599

Iqbal, S.Z., T. Rabbania, M.R. Asic and S.Jinapb. 2014. Assessment of aflatoxins, ochratoxin A and zearalenone in breakfast cereals. **Food Chemistry** 157: 257-262

Iqbal, S.Z., M.R. Asi, U. Hanif, M. Zuber and S. Jinapb. 2016. The presence of aflatoxins and ochratoxinA in rice and rice products; and evaluation of dietary intake. **Food Chemistry** 210: 135-140

Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. 2008. **Safety evaluation of certain food additives and contaminants** TRS 947-JECFA 68/59

Latimer, G.W. Jr. 2016. **Official Method of Analysis of AOAC International20 th edition AOAC International** Chapter 49: 74 -76, Appendix F: 1-18

Lund, F.and J.C. Frisvad. 2003. *Penicillium verrucosum* in wheat and barley indicates presence of ochratoxin A. **Journal of Applied Microbiology** 95: 1117-1123

Magnusson, B. and U. Örnemark. 2014. **EURACHEM Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods, A Laboratory Method Validation and Related Topics, Second edition** Available from www.eurachem.org

Medina, A., G. Gonza´lez, J.M.Sa´ez, R. Mateo. and M. Jime´nez. 2004. Bee pollen, a substrate that stimulates ochratoxinA production by *Aspergillus ochraceus Wilh*. **Systematic and Applied Microbiology** 27: 261-267

Santos, L., S. Mar´ın, V. Sanchis and A.J. Ramos. 2010. Co-occurrence of aflatoxins, ochratoxin A and zearalenone in capsicum powder samples available on the Spanish market. **Food Chemistry** 122(3): 826-830

Scudamore, K.A., J. Banks and S.J. MacDonald. 2003. Fate of ochratoxin A in the processing of whole wheat grains during milling and bread production. **Food Additives and Contaminants** 20: 1153-1163

World Health Organization. 2008. Ochratoxin A. **Safety evaluations of certain 1 food additives and contaminants** WHO food additives series. 59: 357-429

ศักยภาพของสารสกัดเปลือกผลไม้ไทยเพื่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคโนโลยีสีเขียว

A Potential of Thai Fruit Peel Extracts for Green Synthesis of ZnO Nanoparticles

สุริสา สากยโรจน์[1] ประภัสสร รักถาวร[1*] อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ[1] เกสรี กลิ่นสุคนธ์[1] ลลิตา คชารัตน์[1]
ณัฐภรณ์ เปรสันเทียะ[1] และ ทิพาพร ทองคำ[1]

Surisa Sakayaroj[1], Prapasson Rukthaworn[1*], Udomlak Sukatta[1], Ketsaree Klinsuknon[1], Lalita Khacharat[1],
Natthaporn Presunthian[1] and Thipaporn Thongkum[1]

บทคัดย่อ

จากการศึกษาการใช้ประโยชน์จากสารสกัดเปลือกผลไม้ไทย จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ มังคุด ลำไย มะม่วงเขียวเสวยสุก และพันธุ์ทะวาย กล้วย และลิ้นจี่เพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์ โดยตรวจวัดจากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (Abs_{365}) พบว่า สารสกัดเปลือกลิ้นจี่มีศักยภาพในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สูงที่สุด โดยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงถึง 4.17 นาโนเมตร และเมื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ เช่น ความเข้มข้นของสารละลายซิงค์อะซิเตต $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ (5, 10, 20, 30, 40, 50 มิลลิโมล) ความเข้มข้นของสารสกัดเปลือกผลไม้ความเข้มข้นร้อยละ1, 5, 10, 15, 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH 3.0, 7.0 ,9.0, 12, 14) พบว่าสารสกัดจากเปลือกลิ้นจี่จะสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ได้สูงที่สุดเมื่อสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดความเข้มข้นร้อยละ 10 เติมลงสารละลายซิงค์อะซิเตตความเข้มข้น 30 มิลลิโมลที่มีค่าความเป็นกรดด่าง 9 และบ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

ABSTRACT

This research was to study the utilization of 6 Thai fruit peel extracts for the synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) including mangosteen, longan, mango (khiew sawoey), mango (thaway), banana and lychee. The ability of Thai fruit peel extracts on ZnO NPs biosynthesis was detected from the absorbance value at wavelength 365 nm (Abs_{365}). These study indicated that lychee peel extract gave the high tendency to synthesize ZnO NPs which exhibited the sharpest absorbance peak at 365 nm [(Abs_{365}) 4.17 nm]. Different parameters were optimized for synthesizing ZnO NPs including zinc acetate concentration (5, 10, 20, 30, 40, 50 mM), plant extract concentrations (1, 5, 10, 15, 20 % w/v) and pH of the zinc solution (pH 3.0, 7.0, 9.0, 12, 14). The results revealed that the highest ZnO NPs synthesis was achieved by using 10% lychee peel extract added to 30 mM zinc acetate solution at pH 9.0 by 2 hours of incubation at 90 ^{o}C.

Key words: Zinc oxide nanoparticles, Biosynthesis, Fruit peel extracts

* Corresponding author; e-mail address: **aappsr@ku.ac.th**

[1]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI), Bangkok 10900

คำนำ

ซิงค์ออกไซด์ เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ที่ได้มีการศึกษาและวิจัยเป็นจำนวนมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีประโยชน์กว้างขวาง โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ซึ่งสามารถใช้ผสมในสารป้องกันรังสี UVA-UVB เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางกันแดด และจากการที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา จึงสามารถระงับกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ของร่างกาย หรือใช้ในผลิตภัณฑ์กำจัดกลิ่นของเสื้อผ้าอีกทั้งยังใช้เป็นส่วนผสมของยาสมานแผล ลดการอักเสบ รักษาโรคติดเชื้อที่ผิวหนังบางชนิดหรืออาการระคายเคืองตามผิวหนังซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารประกอบที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ และสามารถสังเคราะห์ขึ้นมาให้บริสุทธิ์ได้ มีความคงทนสูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย กระบวนการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์มีหลายกระบวนการโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยใช้วิธีการการระเหยกลายเป็นไอด้วยวิธีทางเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) เช่น กระบวนการ Sol-gel, กระบวนการ Hydrothermal และกระบวนการผสมสารละลาย และวิธีที่ 2 คือ การระเหยกลายเป็นไอด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical vapor deposition; PVD) โดยวิธีที่สนใจศึกษาเป็นกระบวนการชีวสังเคราะห์ โดยใช้สารสกัดจากเปลือกผลไม้ไทย ซึ่งเป็นกระบวนการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้สารเคมี เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการสังเคราะห์ โดยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการนี้ยังคงคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี และในปัจจุบันมีการนำสารสกัดจากส่วนต่างๆของพืชซึ่งประกอบด้วยสารในกลุ่มฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ ฯลฯ มาใช้เป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) เพื่อรีดิวซ์เกลือไอออนของโลหะให้เปลี่ยนเป็นอนุภาคของโลหะระดับนาโนอย่างแพร่หลาย (Dobrucka and Dugaszewska, 2015)ใช้สารสกัดจากดอกโคลเวอร์ในการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้การศึกษาการผลิตอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการทางชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากเปลือกผลไม้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ การศึกษาครั้งนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำสารสกัดจากเปลือกผลไม้มาใช้ในกระบวนการชีวสังเคราะห์เพื่อผลิตอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาสำหรับการใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติที่ดีของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การสกัดสารจากเปลือกผลไม้

ทำการสกัดสารเปลือกผลไม้ที่ผ่านการทำแห้งและบดละเอียดทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ มังคุด ลำไย มะม่วงเขียวเสวยสุก มะม่วงพันธุ์ทะวาย กล้วย ลิ้นจี่ โดยการต้มด้วยน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการกรองแยกส่วนสารละลายเพื่อนำไปทำการทดลองต่อไป

การทดสอบความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ของสารสกัดเปลือกผลไม้ชนิดต่าง ๆ

ทำการทดสอบความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ตามวิธีการของ Jamdagni *et al.* (2018) โดยนำสารสกัดเปลือกผลไม้ความเข้มข้นร้อยละ 5 จำนวน 2 มิลลิลิตร ใส่ลงในสารละลายซิงค์อะซิเตต $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิโมล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และตรวจวัดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วย UV–Vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่นในช่วง 200-800 นาโนเมตร จากนั้นคัดเลือกสารสกัดเปลือกผลไม้ที่มีศักยภาพสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ดีที่สุดจากค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดเปลือกผลไม้ที่มีศักยภาพสูงสุดในการสังเคราะห์จากผลการศึกษาข้างต้นมาศึกษาระดับความเข้มข้นของพืช 5 ระดับ คือ ร้อยละ 1, 5, 10, 15 และ20 โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย Zinc Acetate 6 ระดับคือ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิโมล และที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ 5 ระดับ คือ 3, 7, 9, 12 และ14 ตรวจวัดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วย UV–Vis spectroscopy ที่ความยาวในช่วง 200–800 นาโนเมตร คัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดเปลือกผลไม้

การตรวจวัดลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

ตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะที่เหมาะสมจะถูกล้างด้วยน้ำกลั่น และทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 60องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดให้เป็นผงนำไปตรวจวัดลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ ตรวจวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณเชิงคุณภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วย EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, Hitachi) และตรวจลักษณะทาง morphology ด้วย Field emission scanning electron microscopy (FESEM)

ผลและวิจารณ์การทดลอง

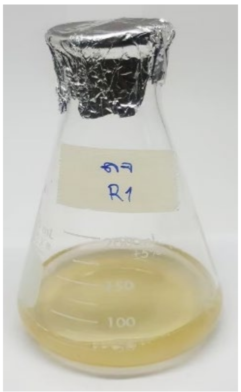
ผลการทดสอบความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากเปลือกผลไม้ชนิดต่าง ๆ

จากการทดลองใช้เปลือกผลไม้ไทยทั้ง 6 ชนิด มาทำการทดสอบความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยใช้กระบวนการทางชีวสังเคราะห์โดยนำสารสกัดเปลือกผลไม้แต่ละชนิดไปทดสอบความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยการสแกนความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และทำการตรวจวัดความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ของพืชแต่ละชนิดโดยวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร พบว่าเปลือกผลไม้แต่ละชนิดมีความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าเปลือกลิ้นจี่สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้สูงที่สุด โดยมีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (Abs_{365}) สูงถึง 4.17 รองลงมาคือ เปลือกมังคุด กล้วย ลำไย มะม่วงพันธุ์ทะวาย และมะม่วงพันธุ์เขียวเสวยสุกที่มีแนวโน้มในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ต่ำที่สุดในระดับเดียวกัน โดยมีค่าดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เท่ากับ 2.64, 1.79, 1.74, 1.28 ตามลำดับ (Table 1) ทั้งนี้เนื่องจากสารสกัดจากเปลือกลิ้นจี่มีปริมาณสารในกลุ่มโพลีฟีนอล และฟลาโวนอยด์ในปริมาณสูง โดยสารสำคัญที่พบมาก ได้แก่ ascorbic acid, phenolic compounds (gallic acid), flavonoids (procyanidin B4, procyanidin B2 and epicatechin) and anthocyanins (cyanidin3-rutinoside, cyanidin 3-glucoside, quercetin-3-rutinoside and quercetin-3-glucoside) (Jiang *et al.*, 2013) ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารรีดิวซ์ในการเปลี่ยนเกลือของโลหะไปเป็นอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ๆ ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chen *et al.* (2011) ที่พบว่าพืชที่มีปริมาณสารในกลุ่มฟีนอลิก และฟลาโวนอยด์สูง เช่น เปลือกส้มจะมีแนวโน้มในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ดี โดยในการทดลองนี้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกลิ้นจี่ พบว่ามีตะกอนขุ่นสีขาวเกิดขึ้น และมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (Abs_{365}) สูงสุดดังแสดงใน Fugure 1

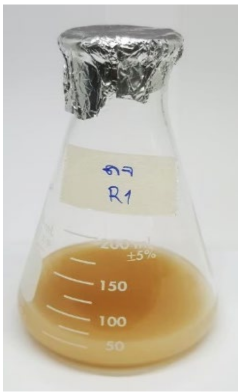
Table 1 A potential of Thai fruit peels on zinc oxide nanoparticles synthesis.

Thai fruit peels	Absorbance peak at 365 nm)Abs$_{365}$)
Mangosteen (*Garcinia mangostana* Linn.)	2.64 ± 0.30^{b}
Longan (*Dimocarpus longan* Lour.)	1.79 ± 0.14^{c}
Mango (Khiew Sawoey)(*Dimocarpus longan* Lour.)	1.28 ± 0.45^{c}
Mango (Thaway) (*Dimocarpus longan* Lour).	1.47 ± 0.28^{c}
Banana (*Musa sapientum* Linn).	1.79 ± 0.14^{c}
Lychee (*Litchi chinensis* Sonn.)	4.17 ± 0.35^{a}

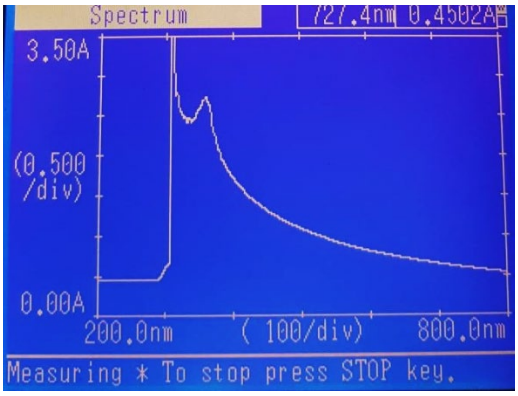
[a,b,c] Means different letters in the same column indicate significant differences ($p<0.05$)



)a(



)b(



)c(

Figure 1 Green synthesis of zinc oxide nanoparticles from lychee peel extract; a = Before incubation, b = After incubation and c = UV-Vis absorption spectrum

คัดเลือกชนิดของสารสกัดเปลือกผลไม้ที่มีความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้สูงที่สุด ได้แก่ สารสกัดเปลือกลิ้นจี่ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมายังไม่มีรายงานเกี่ยวกับการใช้เปลือกลิ้นจี่ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาก่อน ด้วยเหตุนี้จึงเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่น่าสนใจที่จะนำมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อการส่งเสริมการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อไป

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารสกัดเปลือกลิ้นจี่ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลาย Zinc Acetate ต่อประสิทธิภาพในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ กำหนดสารละลาย Zinc Acetate 6 ระดับความเข้มข้น พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Zinc Acetate จาก 5-30 มิลลิโมล การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะค่อยๆเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Zinc Acetate สูงกว่า 30 มิลลิโมล พบว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงใน Figure 1 and 3

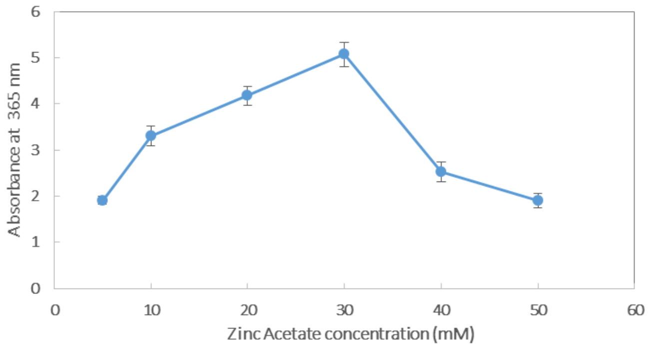
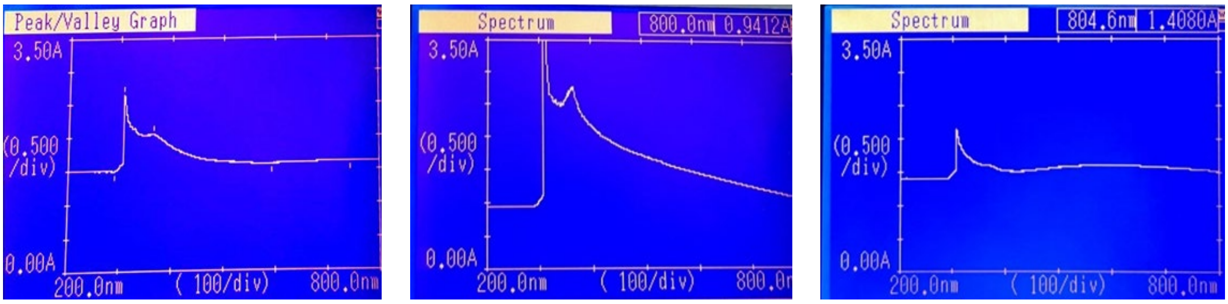


Figure 2 Difference of 365 nm absorption by zinc oxide nanoparticles synthesis from lychee peel extract at different concentrations of zinc acetate.

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย Zinc Acetate ต่อประสิทธิภาพในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเปลือกลิ้นจี่พบว่าสารละลาย Zinc Acetate ที่ระดับความเข้มข้น 30 มิลลิโมล สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้สูงที่สุดโดยมีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้สูงสุดเท่ากับ 5.07



(a) (b) (c)

Figure 3 UV-Vis spectra of zinc oxide nanoparticles synthesis at different concentrations of zinc acetate: (a) 10 mM, (b) 30 mM and (c) 50 mM.

จากนั้นศึกษาผลของความเข้มข้นสารสกัดเปลือกลิ้นจี่ 5 ระดับความเข้มข้น ต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่า ความเข้มข้นของสารสกัดเปลือกลิ้นจี่มีผลต่อความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาค นาโนซิงค์ออกไซด์ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดเปลือกลิ้นจี่จากร้อยละ 1-10 สามารถเพิ่มการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์อย่างช้าๆ และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากเปลือกลิ้นจี่สูงกว่าร้อยละ 10

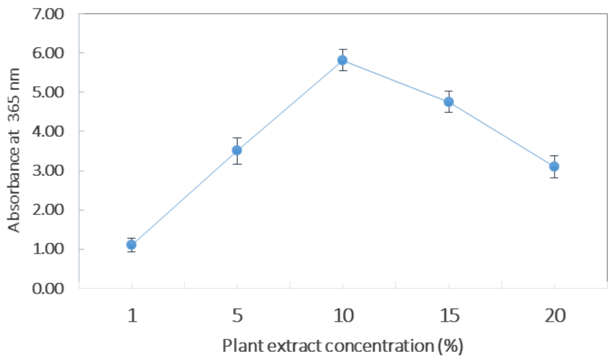


Figure 4 Difference of 365 nm absorption by zinc oxide nanoparticles synthesis from lychee peel extract at different concentrations of plant extract.

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นสารสกัดเปลือกลิ้นจี่ต่อประสิทธิภาพในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่า ความเข้มข้นของสารสกัดเปลือกลิ้นจี่ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้สูงที่สุด (Firuge 4) โดยมีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตรเท่ากับ 5.89 และเมื่อศึกษาผลของระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่า ค่าความเป็นกรดด่างที่ระดับ pH 3 -7 ไม่เกิดการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

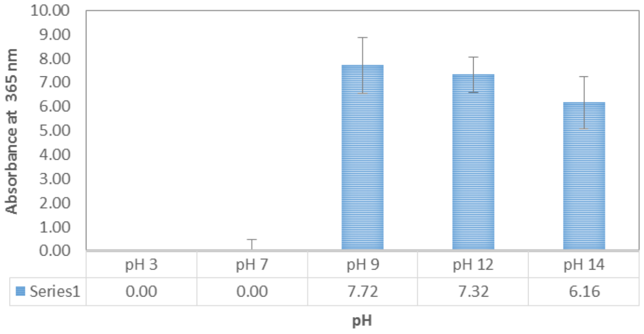
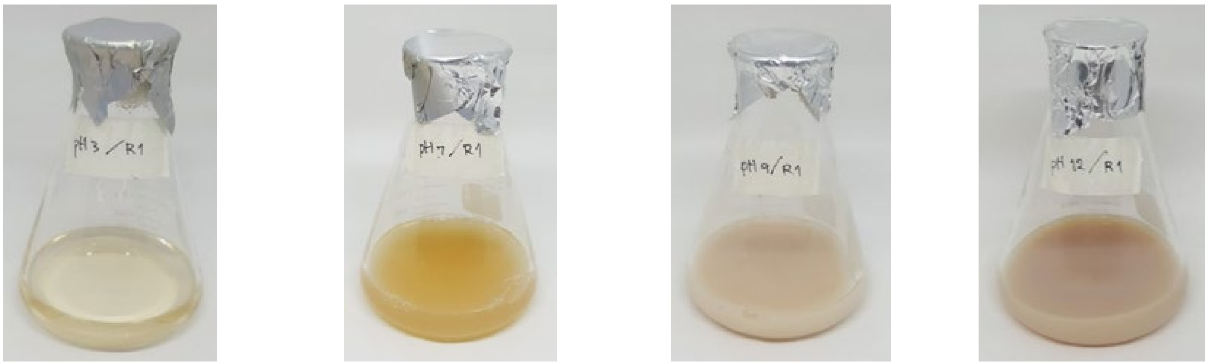


Figure 5 Effect of pH on zinc oxide nanoparticles synthesis at various pH values.

เมื่อระดับความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น pH 7- 9 ส่งผลให้สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ โดยพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่ pH 9 มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (Abs_{365}) สูงถึง 7.72 ดังแสดงใน Figure 5 ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อมีการเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง pH 3- 9 จะมีตะกอนของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งการจากกระบวนการสังเคราะห์เกิดขึ้นซึ่งส่งผลให้สารละลาย Zinc Acetate มีลักษณะขุ่นขึ้น ดังแสดงใน Figure 6 ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Alias *et al.* (2010) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มระดับความเป็นกรด-ด่างที่ pH 8-9 สามารถส่งเสริมให้สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้สูงขึ้น และมีขนาดอนุภาคเล็กลง (Alias *et al.*, 2010)



(a) (b) (c) (d)

Figure 6 Green synthesis of zinc oxide nanoparticles synthesis at various pH values: (a) pH 3, (b) pH 7, (c) pH 9 and (d) pH 12.

การตรวจวัดลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

เมื่อทำการตรวจวัดลักษณะทางกายภาพ และขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ตลอดจนตรวจวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ เชิงคุณภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเปลือกลิ้นจี่ พบว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่ระดับความเป็นกรด-ด่าง 9 จะมีรูปร่างค่อนข้างกลม (spherical shape) และมีขนาดที่หลากหลาย โดยมีขนาดระหว่าง 30-100 นาโนเมตร ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Jamdagni *et al.* (2018) ที่สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยสารสกัดจากลำต้นบอระเพ็ด (*Tinospora cordifolia*) ที่มีรูปร่างค่อนข้างกลมและมีขนาดเฉลี่ย 37 นาโนเมตร นอกจากนี้สามารถตรวจพบปริมาณธาตุ Zn,O และ C ซึ่งแสดงถึงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

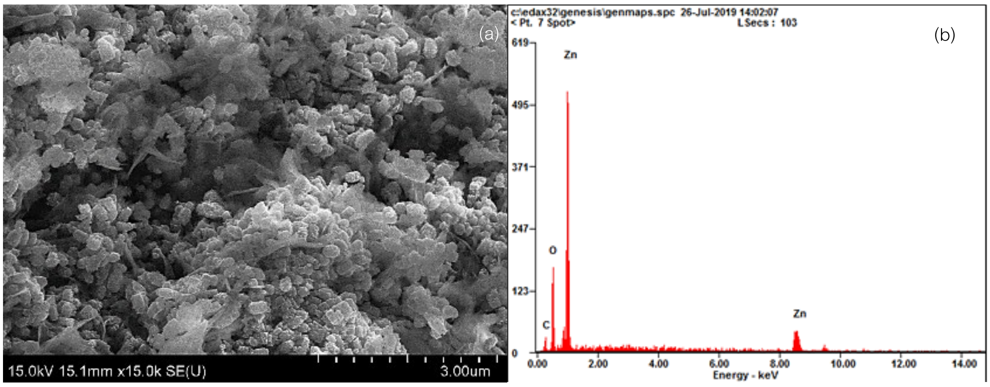


Figure 7 Biosynthesized ZnONPs (a) FESEM (b) EDS spectrum .

สรุป

สารสกัดจากเปลือกผลไม้ที่คัดเลือกมาทำการทดลองทั้งหมด 6 ชนิด มีความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้แตกต่างกัน โดยเปลือกลิ้นจี่มีความสามารถในการสังเคราะห์มากที่สุด และเมื่อนำเปลือกลิ้นจี่มาทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อส่งเสริมการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมโดยการใช้สารสกัดจากเปลือกลิ้นจี่ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 เติมลงในสารละลายซิงค์อะซิเตตที่ระดับความเข้มข้น 30 มิลลิโมล ที่ระดับค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 9 (pH 9.0) ทำการบ่มที่อุณหภูมิ

90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะส่งเสริมการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้สูงสุด และเมื่อนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ตลอดจนตรวจวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ เชิงคุณภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่ระดับ pH 9.0 จะมีรูปร่างและขนาดหลากหลายโดยมีขนาดระหว่าง 100- 300 นาโนเมตร และสามารถตรวจพบปริมาณธาตุ Zn, O และ C

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

Alias, S., A. Ismail and A. Mohamad. 2010. Effect of ph on ZnO nanoparticle properties synthesizedby sol–gel centrifugation. **Journal of Alloys and Compounds**. 499: 231-237.

Anand Raj, L. and E. Jayalakshmy. 2015. A biogenic approach for the synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles produced by tinospora cordifolia. **International Journal of Pharmaceutical Sciences.** 7: 384-386.

Chen, M.L., D.J. Yang and S.C. Liu. 2011. Effects of drying temperature on the flavonoid, phenolic acid and antioxidative capacities of the methanol extract of citrus fruit *Citrus sinensis* (L.) Osbeck. peels. **International Journal of Food Science & Technology**. 46: 1179-1185.

Dobrucka, R. and J. Dlugaszewska. 2016. Biosynthesis and antibacterial activity of ZnO nanoparticles using trifolium pratense flower extract. **Saudi Journal of Biological Sciences.** 23: 517-523.

Gunalan, S., R. Sivaraj and V. Rajendran. 2012. Green synthesized ZnO nanoparticles against bacterial and fungal pathogens. **Progress in Natural Science: Materials International**. 22: 693-700.

He, L., Y. Liu, A. Mustapha and M. Lin. 2011. Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles against *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*. **Microbiological Research**. 166: 207-215.

Jamdagni, P., P. Khatri and J. Rana. 2018. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using flower extract of nyctanthes arbor-tristis and their antifungal activity. **Journal of King Saud University-Science**. 30: 168-175.

Jiang, G., S. Lin, L. Wen, Y. Jiang, M. Zhao, F. Chen, K.N. Prasad, X. Duan and B. Yang. 2013. Identification of a novel phenolic compound in litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) pericarp and bioactivity evaluation. **Food Chemistry**. 136: 563-568.

Moezzi, A., A.M. McDonagh and M.B. Cortie. 2012. Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications. **Chemical Engineering Journal**. 185: 1-22.

Nagarajan, S. and K.A. Kuppusamy. 2013. Extracellular synthesis of zinc oxide nanoparticle using seaweeds of gulf of mannar, india. **Journal of Nanobiotechnology**. 11: 39.

Characteristics of Baked Spinach with Cheese after Treated by High Pressure Processing

Chutima Mattar[1], Wannasawat Ratphitagsanti[1*] and Phunsiri Suthiluk[2]

ABSTRACT

High pressure processing (HPP) can be used as a post-lethality treatment to prevent cross contamination of ready-to-eat (RTE) food, while maintaining product quality. Although HPP can preserve heat sensitive compounds, certain changes can occur, especially on high molecular weight molecules (lipid, protein and carbohydrate). The objective of this study was to determine physical, chemical and microbiological qualities of baked spinach with cheese after treated by HPP at various conditions. Commercial baked spinach with cheese was compared with HPP treated samples (400, 500 and 600 MPa for 10 min). The net color difference value (ΔE^*) was not significantly different between HPP treated and untreated samples in cheese and cream layers ($p>0.05$). Spinach layer showed differences of ΔE^* resulting from a decrease in L* (lightness) value. pH of HPP-treated samples remained unchanged, while water activity (a_w) slightly changed ($p\leq0.05$). Texture was analyzed by penetration mode. Changes on textural properties of HPP-treated samples were minorly observed in firmness but not in adhesiveness. Microbial analyses of commercial baked spinach with cheese were approximately 2.1±0.2, 1.3±0.0, 1.2±0.3 and <1.0 log CFU/g for total aerobic bacteria, yeast and mold, lactic acid bacteria and bacterial spore, respectively. HPP treatment (400-600 MPa for 10 min) decreased numbers of microorganisms to under detection limit of standard plate count (less than 1 log CFU/g). In conclusion, HPP could remain physical and chemical characteristics of baked spinach with cheese including color of cream, pH, a_w and texture (adhesiveness). Natural microflora was reduced by using HPP from 400–600 MPa for 10 min pressure holding time to under detection limit. HPP could potentially improve food safety of baked spinach with cheese when stored at refrigerated condition.

Key word: baked spinach, cheese, high pressure processing, ready-to-eat

* Corresponding author; e-mail address: wannasawat.r@ku.ac.th

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]School of Agro-Industry, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, 57100

INTRODUCTION

Baked spinach with cheese is one of the popular Italian cuisines due to its rich source of nutrients, providing high energy and flavorful taste. At present, this dish is commercially available in ready-to-eat (RTE) form. RTE foods have been consumed widely and have driven to high demand due to socio-economic and life style changing (Chandrasekara and Shahidi, 2015). Foods are typically cooked, packed and chilled before distribution. However, contamination after cooking and during packaging can shorten shelf-life of product. High pressure processing (HPP) has been used to extend shelf-life of several RTE products by serving as a post-lethality step, specifically in RTE meat products. HPP is nonthermal technology governing pressure to transmit instantaneously and uniformly throughout a sample. HPP not only can inactivate microorganisms to produce safe food but it also renders minimal changes on food's flavor, texture, appearance and nutritional quality (James and James, 2015). HPP treated product is similar to fresh products. Jung *et al*. (2012) and Wang *et al*. (2012) observed the effects of HPP on spinach leaves and spinach puree. Spinach after HPP treatment was reported to be able to maintain color and heat sensitive compounds. Although quality of HPP treated product was better than thermal processing, it could impact high molecular weight compositions leading to changes on product qualities. When dairy products are processed by HPP, protein denaturation occurs. In addition, fat composition is reported to have baroprotective effect that can support microbial survival and protect stress from external environment (San Martín-González *et al*., 2006). The main ingredients of baked spinach with cheese are spinach and dairy products. There have been limited studies of the influence of HPP on low-acid food. Therefore, the objective of this study was to investigate the effect of high pressure processing on quality characteristics of baked spinach with cheese that was an RTE with complex food system containing cheese, milk, cream and spinach.

MATERIALS AND METHODS

1. Baked spinach with cheese preparation

Commercial baked spinach with cheese has 3 layers which are cheese, cream and spinach. Baked spinach with cheese was filled in polypropylene (PP) tray and sealed with polyethylene terephthalate (PET)/ cyclopentadiene (CPD) film. After that, samples were individually packed in the linear low-density polyethylene (LLDPE)/ nylon vacuum pouch before vacuum packaging. Samples were kept at approximately 4-8^{o}C and were treated by HPP within 48 h after manufacturing.

2. HPP treatments

Samples were placed in vessel of HPP (Bao Tou KeFa High Pressure Technology Co., Ltd., China) with capacity of 3 L. Medium for pressure transmission is reverse osmosis (RO) water. Samples

were treated at 400, 500 and 600 MPa for 10 min. After treatment, the samples were stored at approximately 4-8°C and analyzed for physical, chemical and microbiological properties within 24 h.

3. Physical and chemical measurement

Commercial baked spinach with cheese was served as untreated control. HPP treated samples were determined for physical and chemical qualities. Samples were evaluated for color (CIE L*a*b*), pH, water activity (a_w) and texture analyses. Color was carried out by spectrophotometer (Minolta, model CM-3500d, Aichi, Japan) with a standard illuminant D65 and standard observation angle at 10°. Each layer of baked spinach with cheese, specifically cheese, cream and spinach layer was determined for the net color difference (ΔE^*). ΔE^* was calculated from the differences of L*, a* and b* between HPP treated samples and untreated control as shown in Equation 1.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

pH was measured by pH meter (SI Analytics Serie Lab 855, Germany) after the sample was mixed with deionized water at ratio 1:1 (Stratakos *et al.*, 2015). Water activity was measured by water activity meter (Aqua LAB, Model Serie 3TE, Washington, USA). Textural properties were analyzed by Texture Analyzer (TA.XT Plus Texture Analyzer, Stable Micro System, and England) in which firmness and adhesiveness were obtained by P/5 cylinder probe (test speed 2.00 mm/sec; strain 70.00%) using penetration mode (Modified from Zahorec *et al.*, 2017).

4. Microbial analyses

After HPP treatment for 24h, baked spinach with cheese was placed in sterile stomacher bag (BA6041/STR, Stomacher 400 Classic Strainer bag, Seward, UK) and was homogenized in a stomacher for 1 min. The homogeneous sample (1 ml) was diluted into 9 ml of 0.1% peptone water. Pour plating was carried out by placing 1 ml of serial dilution onto disposable Petri dish, then mixed with PCA (Plate Count Agar, Merck KGaA, Germany) for total aerobic bacteria counts, PDA (Potato Dextrose Agar, Merck KGaA, Germany) for yeast and mold counts, and MRS (De Man, Rogosa and Sharpe agar, Difco, Becton Dickinson and Company, France) for lactic acid bacteria counts. PCA and MRS plates were incubated at 35°C for 48 h while PDA plates were incubated at 25°C for 120 h (Food and Drug Administration. Bacteriological, 2001). Numbers of microorganism were reported as an average of log CFU/g. For determination of bacterial spore numbers, 10 g of baked spinach with cheese was filled in 50 ml of sterilized PP tube and placed in water bath at 70°C for 15 min before serial dilution and pour plating with PCA (Bennett and Belay, 2001).

5. Statistical analysis

Data was performed by Analysis of Variance (ANOVA) and Duncan's Multiple Range Tests with SPSS statistical software version 12.0 (IBM Thailand Co., Ltd., Bangkok, Thailand). pH, water activity, color value and texture were expressed as means ± standard deviation. The p-value at 0.05 was considered significantly different.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Effects of HPP on physical and chemical characteristics compared with untreated control

Untreated control and HPP treated samples (pressure at 400, 500 and 600 MPa for 10 min) were evaluated for physical and chemical characteristics such as color (ΔE^*), pH, water activity (a_w) firmness and adhesiveness. L* (lightness), a* (redness/ greenness) and b* (yellowness/ blueness) of untreated control were 73.00, 2.18 and 27.62 in cheese layer, 87.77, -0.81 and 13.30 in cream layer and 50.16, -6.73 and 13.43 in spinach layer, respectively. When HPP treated samples were measured for color and calculated the ΔE^* in every layer of baked spinach with cheese (Table 1), only ΔE^* of spinach layer was found significantly different ($p \leq 0.05$). Treatment at pressure of 600 MPa for 10 min had the highest ΔE^*. When increasing pressure, L* of spinach layer was significantly decreased (data not shown). Jung *et al*. (2012) and Wang *et al*. (2012) studied the effect of HPP on color of spinach. HPP could damage permeable membrane of plant cells including the chloroplasts. This phenomenon leads to leak of chlorophyll and is probably the cause of changed color of spinach. Moreover, compression heating during processing could impact on color. When HPP treatment was compared with heat treatment, ΔE^* of heat treatment (100ºC for 60 s) was more than 12 (Jung *et al*., 2012). A decrease on a* of heat treated spinach was observed at -6.55, whereas a* of untreated control was -11.20 (Wang *et al*., 2012). In baked spinach with cheese, HPP could preserve product's appearance. In addition, cream layer revealed the minimum ΔE^* between 1.24±0.29 and 1.44±0.25, which experienced observers cannot detect (Mokrzycki and Tatol, 2011).

pH of untreated control was 6.25±0.05 and pH of HPP treated samples were not significantly different with untreated control ($p > 0.05$). Results showed similar trend to Chakraborty *et al*. (2015) which reported the unchanging of pH in pineapple puree between untreated control and those obtained from the combined conditions of pressures (200, 400, 500 and 600 MPa) and temperatures (50, 60 and 70°C) for 10, 15 and 20 min. However, pH of HPP treated spinach puree increased from 5.89 to 6.50 due to the self-ionization of water (Wang *et al*., 2012). Water activity of HPP treated samples was slightly different among samples. It ranged from 0.983±0.002 to 0.988±0.005, which was similar to that of untreated control (0.984±0.002). Del Olmo *et al*. (2019) reported that HPP mildly affected on a_w of *Laminaria ochroleuca* (kombu seaweed) but did not affect on a_w of fresh cheese (Evrendilek *et al*., 2008).

Table 1 The net color difference (ΔE*), pH and water activity (a_w) of untreated control and HPP treated baked spinach with cheese.

Pressure (MPa)	ΔE*			pH	a_w
	Cheese layer	Cream layer	Spinach layer		
0.1	-	-	-	6.25±0.05	0.984±0.002^{b}
400	6.91±0.37	1.44±0.25	3.37±0.69^{ab}	6.35±0.05	0.987±0.002^{ab}
500	7.43±2.25	1.36±0.03	2.59±0.17^{b}	6.41±0.04	0.983±0.002^{b}
600	7.95±1.86	1.24±0.29	4.48±1.97^{a}	6.24±0.25	0.988±0.005^{a}

$^{a-b}$ Different letters in the same column indicate significant difference at $p \leq 0.05$.

Texture analyses were observed on firmness and adhesiveness by P/5 cylinder probe for pressed testing into baked spinach with cheese (Table 2). Penetration indicated that adhesiveness was not significantly different (p>0.05), while firmness of HPP treated samples at 500 MPa was slightly different ($p \leq 0.05$) with untreated control. Neetoo *et al*. (2011) showed decreasing of firmness in onions at pressure between 400 and 500 MPa and temperature at 20-40°C. Okpala *et al*. (2010) investigated the effect of HPP (9-291 MPa for 1-29 min) on texture of fresh cheese and found that adhesiveness of HPP treated fresh cheese ranging from 0.03 to 1.37 N·s.

Table 2 Firmness and adhesiveness from penetration test of untreated control and HPP treated baked spinach with cheese.

Pressure (MPa)	Firmness (N)	Adhesiveness (N·s)
0.1	0.45±0.11^{a}	0.30±0.07
400	0.38±0.05^{ab}	0.31±0.04
500	0.37±0.06^{b}	0.29±0.06
600	0.39±0.12^{ab}	0.29±0.04

$^{a-b}$ Different letters in the same column indicate significant difference at $p \leq 0.05$.

2. Determination of microbial populations in HPP treated bake spinach with cheese and untreated control

Numbers of microorganisms of freshly prepared sample (untreated control) were ~2.1±0.2 log CFU/g of total aerobic bacteria counts, ~1.3±0.0 log CFU/g of yeast and mold counts and ~1.2±0.3 log CFU/g of lactic acid bacteria counts. According to Centre for Food Safety, Food and Environmental Hygiene Department (2014), the borderline level of cooked chilled foods with minimum handlings prior to sale or consumption must be less than 7 log CFU/g of aerobic colony counts while acceptable guideline levels for determining the microbiological quality of New South Wales Food Authority (2009)

have to be less than 7 log CFU/g. Although aerobic bacteria counts of untreated control were below standard, they can grow up and increase in numbers until unsafely to consume. When baked spinach with cheese was treated by HPP, numbers of microorganisms were found less than 1.0 log CFU/g in all treatments (Table 3). In addition, Stratakos *et al*. (2015) stated that HPP could reduce total aerobic bacteria and lactic acid bacteria counts of lasagna to 1.34 log CFU/g and below 2 log CFU/g when treated at 600 MPa for 1 min, respectively. HPP can effectively inactivate several vegetative microorganisms; however, bacterial spore is resistant to high pressure. Bacterial spore can survive up to 1,200 MPa at room temperature. Therefore, bacterial spore might germinate and grow with doubling in numbers. The most important sporeforming bacteria related to food are *Bacillus* and *Clostridium*. Especially, *Bacillus cereus* is normally found in soil, on surface of vegetables and processed foods. Food poisoning from *B. cereus* could occur during storage at abuse temperatures for long time, with number of *B. cereus* more than 6 log CFU/g (Food and Drug Administration, 2001). In this study, HPP treated baked spinach with cheese showed less than 1.0 log CFU/g of bacterial spore counts. The results indicated that HPP was able to perform as a post lethality treatment, thus increasing safety of in-packed cooked-chilled products.

Table 3 Numbers of microorganisms (log CFU/g) of untreated control and HPP treated baked spinach with cheese.

Pressure (MPa)	Numbers of microorganisms (log CFU/g)			
	Total aerobic bacteria	Yeast and Mold	Lactic acid bacteria	Bacterial spore
0.1	2.1±0.2 est.	1.3±0.0 est.	1.2±0.3 est.	<1.0 est.
400	<1.0 est.	<1.0 est.	<1.0 est.	<1.0 est.
500	<1.0 est.	<1.0 est.	<1.0 est.	<1.0 est.
600	<1.0 est.	<1.0 est.	<1.0 est.	<1.0 est.

est. means the estimated value.

CONCLUSIONS

Characteristics of HPP treated baked spinach with cheese such as color of cheese and cream, pH, a_w and texture (adhesiveness) resembled untreated control, regardless of pressure levels (400-600 MPa). In addition, HPP could enhance food safety by reducing numbers of microorganisms in baked spinach with cheese (less than 1.0 log CFU/g of total aerobic bacteria, yeast and mold, lactic acid bacteria and bacterial spore counts). Although no survivors of microorganisms were found after HPP treatment, injured cells could repair and recover to increase numbers in food. Further study is needed to ensure product safety throughout the extended shelf-life period.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support of this research was from Thailand Science Research and Innovation (TSRI) (RDG6250010) and in part of Value Sourcing Co., Ltd.

REFERENCES

Bennett, W. and N. Belay. 2001. *Bacillus cereus*, pp. 311-324. *In* F. P. Downes and K. Ito, eds. **Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods**. Sheridan Books, Inc. , Washington, DC.

Centre for Food Safety, Food and Environmental Hygiene Department. 2014. **Microbiological Guidelines for Food (For ready-to-eat food in general and specific food items)**. Available Source: https://www.cfs.gov.hk/english/food_leg/files/food_leg_Microbiological_Guidelines_for_Food_e.pdf, Sep 8, 2019.

Chakraborty, S., P.S. Rao, and H.N. Mishra. 2015. Effect of Combined High Pressure–Temperature Treatments on Color and Nutritional Quality Attributes of Pineapple (*Ananas Comosus L.*) Puree. **Innovative Food Science and Emerging Technologies** 28: 10–21.

Chandrasekara, A. and F. Shahidi. 2015. The use of antioxidants in ready-to-eat (RTE) and cook-chill food products, pp. 433-446. *In* F. Shahidi, ed. **Handbook of Antioxidants for Food Preservation**. Woodhead, Publishing.

Del Olmo, A., A. Picon and M. Nuñez. 2019. High pressure processing for the extension of *Laminaria ochroleuca* (kombu) shelf-life: A comparative study with seaweed salting and freezing. **Innovative Food Science and Emerging Technologies** 52: 420-428.

Evrendilek, G.A., N. Koca, J.W. Harper and V.M. Balasubramaniam. 2008. High-pressure processing of Turkish white cheese for microbial inactivation. **Journal of Food Protection** 71(1): 102-108.

Food and Drug Administration. 2001. **Analytical Manual Bacillus cereus. Bacteriological Analytical Manual**. Gaithersburg, MD, USA.

James, S. and C. James. 2015. Minimal processing of ready meals, pp. 599-612. *In* D.-W. Sun, ed. **Emerging Technologies for Food Processing** (Second Edition). Academic Press.

Jung, L.-S., S.H. Lee, S. Kim, S.-K. Lee and J. Ahn. 2012. Effect of high pressure processing on microbiological and physical qualities of carrot and spinach. **Food Science and Biotechnology** 21(3): 899-904.

Mokrzycki, W.S. and M. Tatol. .2011Colour difference ΔE-A survey. **Machine Graphics and Vision** (4)20: .411-383

Neetoo, H., S. Nekoozadeh, Z. Jiang and H. Chen. 2011. Application of high hydrostatic pressure to decontaminate green onions from *Salmonella* and *Escherichia coli* O157:H7. **Food Microbiology** 28(7): 1275-1283.

New South Wales Food Authority. 2009. **Microbiological quality guide for ready-to-eat foods: A guide to interpreting microbiological**. Available Source: http://www.foodauthority.nsw.gov.au/_Documents/scienceandtechnical/microbiological_quality_guide_for_RTE_food.pdf, Sep 8, 2019.

Okpala, C.O., J.R. Piggott and C.J. Schaschke. 2010. Influence of high-pressure processing (HPP) on physico-chemical properties of fresh cheese. **Innovative Food Science and Emerging Technologies** 11(1): 61-67.

San Martín-González, M.F., J. Welti-Chanes and G.V. Barbosa-Canovas. 2006. Cheese manufacture assisted by high pressure. **Food Reviews International** 22(3): 275-289.

Stratakos, A.Ch., M. Linton, M.F. Patterson and A. Koidis. 2015. Effect of high-pressure processing on the shelf life, safety and organoleptic characteristics of lasagne ready meals during storage at refrigeration and abuse temperature. **Innovative Food Science and Emerging Technologies** 30: 1-7.

Wang, R., T. Wang, Q. Zheng, X. Hu, Y. Zhang and X. Liao. 2012. Effects of high hydrostatic pressure on color of spinach puree and related properties. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 92(7): 1417-1423.

Zahorec, J.J., D.M. Šoronja-Simović, Z.I. Šereš, O.D. Šimurina, A. I. Selaković, N.R. Maravić and B.V. Filipčev. 2017. Effects of quantity and layers number of low trans margarines on puff pastry quality. **Food and Feed Research** 44(1): 47-55.

การผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์จากชานอ้อยด้วยเอนไซม์ไซลาเนสหยาบของ *Thermobifida fusca* PA 1-1

Xylo-oligosaccharide Production from Sugarcane Bagasse Using Crude Xylanase of *Thermobifida fusca* PA 1-1

__ปวริศา อัตรัง__[1*] ปาริชาติ ศรีระพันธุ์[1] มังกร โรจน์ประภากร[1] และ วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา[1]

__Pawarisa Attrang__[1*], Parichad Sriraphan[1], Mangkorn Rodprapakorn[1] and Wirat Vanichsriratana[1]

บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีชานอ้อยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาลปริมาณหลายล้านตันต่อปี ดังนั้นการผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์จากชานอ้อยซึ่งผ่านกระบวนการปรับสภาพโดยใช้ด่างและความร้อนแล้ว (ATPSB) ด้วยเอนไซม์ไซลาเนสหยาบจาก *Thermobifida fusca* PA 1-1 จึงถูกศึกษาเพื่อเพิ่มมูลค่าของชานอ้อย ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการย่อยเพื่อผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเอนไซม์ไซลาเนสหยาบอัตราส่วน 50 500 1000 และ 2000 ยูนิตต่อกรัม ATPSB พบว่าอัตราส่วนที่ให้ปริมาณไซโลโอลิโกแซคคาไรด์สูงสุดคือ 2000 ยูนิตต่อกรัม ATPSB ที่ pH 6 และอุณหภูมิ 60 ^{O}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การวิเคราะห์องค์ประกอบของไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ในสารสกัดด้วยเทคนิคโครมา-โตกราฟีแผ่นบาง (Thin-layer Chromatography, TLC) พบว่าประกอบด้วยโอลิโกเมอร์ของน้ำตาลไซโลส คือ ไซโล-ไบโอส (xylo-biose, X2) ไซโลไตรโอส (xylo-triose, X3) และไซโลเตตระโอส (xylo-tetraose, X4) ประกอบอยู่ในสารสกัดไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้ และผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของไซโลโอลิโกเมอร์ตั้งแต่ 2 ถึง 4 โมเลกุลด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) พบว่าสัดส่วนของไซโลเตตระโอส (X4) มีปริมาณสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 89.50 ขององค์ประกอบทั้งหมด

ABSTRACT

In Thailand, sugarcane bagasse, by-product of sugar industry, is obtained several million tons annually. Therefore, xylo-oligosaccharide (XOS) production from alkali-thermal pretreated sugarcane bagasse (ATPSB) by crude xylanase of *Thermobifida fusca* PA 1-1 was studied to increase value of sugarcane bagasse. The results from optimal digestion conditions for XOS production by using crude xylanase at ratio of 50 500 1000 and 2000 U/g ATPSB showed that the ratio of 2000 U/g ATPSB release the highest amount of XOS at pH 6 and temperature 60 ^{O}C for 24 hrs. The component analysis by Thin-layer Chromatography (TLC) showed 3 oligomers of xylose - xylo-biose (X2), xylo-triose (X3), and xylo-tetraose (X4), contained in XOS extract. The quantitative analysis of xylo-oligomer for the degree of polymerization of 2 to 4 (DP2-DP4) by High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) showed that the highest proportion was xylo-tetraose, which was at 89.50% of the total components.

Key words: sugarcane bagasse, xylo-oligosaccharide, xylanase, *Thermobifida fusca* PA 1-1

* Corresponding author; e-mail address: pawarisa.at@ku.th

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) เป็นวัสดุที่พบในธรรมชาติ ส่วนใหญ่มีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นองค์ประกอบภายในโครงสร้างของผนังเซลล์ (Lee *et al.*, 2008) โดยทั่วไปจะเป็นวัสดุที่เหลือตกค้างอยู่ในไร่นาหลังเก็บเกี่ยว ส่วนของใบ ลำต้น และราก เป็นจำนวนมากที่ต้องหาทางกำจัดทำลายทิ้ง เกษตรกรมักใช้วิธีการเผาเพื่อทำลายซึ่งล้วนแต่เป็นการสร้างมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อมทั้งทางน้ำและทางอากาศทั้งสิ้น นับเป็นการสูญเปล่าที่น่าเสียดายเป็นอย่างยิ่งจึงได้มีการคิดค้นหาหนทางนำส่วนเหลือใช้ที่ต้องกำจัดทิ้งเหล่านี้มาทำให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่าหลายแนวทาง (รัชพล, 2558) ชานอ้อย (bagasse) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการหีบอ้อยเพื่อผลิตน้ำตาลทราย ซึ่งในแต่ละปีมีปริมาณชานอ้อยเหลือทิ้งหลายล้านตัน คิดเป็นปริมาณ 27.0-29.0 เปอร์เซ็นต์ของอ้อยที่เข้าหีบ (มิตรผล, 2554) พบการนำชานอ้อยไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ ได้แก่ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าใช้ภายในโรงงานผลิตน้ำตาลทราย ตลอดจนใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง วัตถุคลุมดินเพื่อรักษาความชื้นของดินและป้องกันวัชพืช ปัจจุบันได้มีการตระหนักถึงคุณค่าของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมากขึ้น จึงมีการใช้ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มมูลค่าไซแลนที่มีอยู่ในชานอ้อยโดยการสกัดเพื่อแยกองค์ประกอบ เนื่องจากไซแลนเป็นพอลิเมอร์ที่มีความซับซ้อน ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลสหลายโมเลกุล ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของไซแลนมีความหลายหลาก และมีสมบัติแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของพืชที่เป็นแหล่งไซแลน นอกจากนั้นแล้วไซแลนยังสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสกัดไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ (xylo-oligosaccharides, XOS) ซึ่งเป็นน้ำตาลโอลิโกเมอร์ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ ปัจจุบันนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และสารมีฤทธิ์ในการส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ (เบญจวรรณ และคณะ, 2559) พบว่าการใช้เอนไซม์ไซลาเนสซึ่งมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายไซแลนเพื่อเป็นน้ำตาลหลายโมเลกุลมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากไซลาเนสมีความจำเพาะต่อไซแลนที่เป็นสับสเตรทของเอนไซม์ โดยทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความเข้มข้นของสับสเตรทซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการย่อย ซึ่งมีรายงานว่าจุลินทรีย์หลายชนิดสามารถผลิตไซลาเนสได้ โดยไซลาเนสแต่ละชนิดมีความสามารถในการย่อยไซแลนต่างกัน โดยให้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลต่างกัน และไซลาเนสแต่ละชนิดทำงานร่วมกันในการย่อยไซแลนให้สมบูรณ์ (จักรกฤษณ์ และคณะ, 2546)

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์จากชานอ้อยด้วยวิธีทางเทคโนโลยีชีวภาพโดยใช้เอนไซม์ไซลาเนสหยาบซึ่งผลิตจากจุลินทรีย์ เพื่อลดการใช้สารเคมีที่ก่อให้เกิดอันตรายและสารตกค้าง โดยศึกษาอัตราส่วนปริมาณเอนไซม์หยาบต่อปริมาณชานอ้อยผ่านการกำจัดลิกนินออกแล้วที่เหมาะสมต่อการผลิตไซโล-โอลิโกแซคคาไรด์ และศึกษาขนาดโมเลกุลและปริมาณของไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้ด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมชานอ้อยโดยการกำจัดลิกนินออก

ล้างชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล และลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ให้มีขนาด 30-40 เมช กำจัดลิกนินออกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1% (w/v) 20 มิลลิลิตรต่อชานอ้อย 1 กรัม ในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้ออุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ล้างชานอ้อยด้วยน้ำกลั่น จนพีเอชเป็นกลางเมื่อทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส อบแห้งในตู้อบอุณภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาชานอ้อยผ่านการกำจัดลิกนินออกแล้วไว้ในโถดูดความชื้นระหว่างรอใช้งาน

การผลิตเอนไซม์ไซลาเนสหยาบจาก *Thermobifida fusca* PA 1-1 และการวิเคราะห์ค่ากิจกรรม

ถ่ายโคโลนีเดี่ยวของ *T. fusca* PA 1-1 ลงในอาหารเหลว L-medium ปริมาตร 5 มิลลิลิตร บ่มในสภาวะให้อากาศโดยเขย่า 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 36 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายลงในอาหารเหลว Minimal salts-yeast extract ซึ่งเติมชานอ้อยผ่านการกำจัดลิกนินออกแล้ว 1% (w/v) เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตในสภาวะพีเอช 10.0 ปริมาตร 45 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร บ่มโดยเขย่า 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 4 วัน แยกเก็บเฉพาะส่วนใสโดยการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที และเก็บรักษาส่วนใสที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้สำหรับการผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์

วิเคราะห์ค่ากิจกรรมเอนไซม์ไซลาเนสโดยเจือจางสารละลายเอนไซม์ไซลาเนสด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 เพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสม เติมสารละลายเอนไซม์ไซลาเนสที่เจือจางปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลองที่มีสารละลายสับสเตรทไซแลนเข้มข้น 1% (v/v) ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ผสมสารละลายให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมสาร นำไปบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ปลดปล่อยออกโดยวิธีดัดแปลงจาก Miller (1959) จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยเทียบจากกราฟมาตรฐานไซโลส โดยไม่มีการเติมสารละลายเอนไซม์ไซลาเนสในชุดควบคุม จากนั้นนำไปคำนวณค่ากิจกรรมเอนไซม์ดังสมการที่ 1

ค่ากิจกรรมเอนไซม์ (Unit/mL) = (OD_{enzyme}- $OD_{substrate}$) *1000* 10* Dilution /(slope * MW * Time) (สมการ 1)

โดยที่ OD_{enzyme} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างเอนไซม์

$OD_{substrate}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสับสเตรท

Dilution คือค่าการเจือจางสารละลายเอนไซม์ (เท่า)

Slope คือ ความชันของสารละลายมาตรฐานน้ำตาลไซโลส

MW คือ น้ำหนักโมเลกุลของน้ำตาลไซโลส

Time คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (นาที)

โดยกำหนดให้ 1 หน่วย (Unit) เอนไซม์ไซลาเนสเท่ากับปริมาณเอนไซม์ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายไซแลน ทำให้เกิดการปลดปล่อยน้ำตาลรีดิวซ์ปริมาณ 1 ไมโครโมลต่อนาที ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

การผลิตไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์

ทำการผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์โดยการย่อยชานอ้อยผ่านการกำจัดลิกนินออกแล้วน้ำหนัก 1 กรัมด้วยเอนไซม์ไซลาเนสหยาบจาก *T. fusca* PA 1-1 ปริมาณ 50, 500, 1000 และ 2000 ยูนิต ใน 50 มิลลิโมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างส่วนใสที่เวลา 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 24 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดวิเคราะห์โดยวิธี Phenol-Sulfuric method ตามวิธีการของ Dubois et al. (1956) โดยนำตัวอย่างส่วนใสของสารละลายไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ผสมอย่างรวดเร็วกับสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 5% (w/v) ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันอย่างรวดเร็ว ตั้งทิ้งไว้นาน 30 นาที แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร โดยทำการหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยเทียบกับกราฟมาตรฐานน้ำตาลไซโลส

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีดัดแปลงของ Miller (1959) โดยใช้สารละลาย Dinitrosalicylic acid ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ลงในตัวอย่างส่วนใสของสารสกัดไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน ต้มในน้ำเดือดนาน 5 นาที แล้วแช่ในน้ำเย็นจัดนาน 5 นาที เติมน้ำกลั่นปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานน้ำตาลไซโลส และทำการคำนวณปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ ดังสมการที่ 2

ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด – ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (สมการ 2)

การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยแผ่นวิเคราะห์สารด้วยวิธีโครมาโตกราฟีแผ่นบาง (Thin-layer Chromatography, TLC)

วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำตาลไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเทคนิค TLC โดยวิธีการดัดแปลงจาก Apiraksakorn et al. (2008) หยดตัวอย่างส่วนใสของสารละลายไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ที่ย่อยได้ลงบนแผ่นอลูมิเนียม TLC ปริมาตร 15 ไมโครลิตร เป่าให้แห้ง นำแผ่น TLC แช่ในวัฏภาคเคลื่อนที่ผสม บิวทานอล, เอทานอล และน้ำ ในอัตราส่วน 5:3:2 ซึ่งเตรียมไว้ไม่เกิน 1 ชั่วโมง จนกระทั่งวัฏภาคเคลื่อนที่ถึงขีดบนที่กำหนดให้ห่างจากขอบด้านบนของแผ่น TLC 1 เซนติเมตร นำแผ่น TLC มาเป่าให้แห้ง จากนั้นแช่ในวัฏภาคเคลื่อนที่ซ้ำอีกครั้ง ทำการเป่าให้แห้งเช่นเดิม ฉีดพรมสารละลายซัลฟูริกในสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 5% (v/v) ให้ทั่วแผ่น TLC อบที่ 150 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และทำการเปรียบเทียบผลกับน้ำตาลมาตรฐานไซโลส (X1) ไซโลไบโอส (X2) ไซโลไทรโอส (X3) ไซโลเตตระโอส (X4) และไซโลเพนตาโอส (X5) ซึ่งหยดบนแผ่น TLC โดยใช้ปริมาตร 4 ไมโครลิตร

การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)

วิเคราะห์ขนาดโมเลกุลและปริมาณของไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ โดยดำเนินการตามวิธีดัดแปลงจาก Choi *et al*. (2016) ด้วยเครื่อง HPLC ของบริษัท Shimadzu รุ่น UFLC คอลัมน์ Shodex sugar KS-801 ขนาดความยาว 300 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มิลลิเมตร ปริมาตรของตัวอย่างที่วิเคราะห์ 20 ไมโครลิตร โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นวัฏภาคเคลื่อนที่ (mobile phase) ที่อัตราเร็วการป้อนเข้า 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สำหรับการวิเคราะห์ไซโลไบโอส (X2) ไซโลไตรโอส (X3) และไซโลเตตระโอส (X4) โดยวิเคราะห์ปริมาตรจากพื้นที่ใต้กราฟ (peak) ซึ่งคำนวณโดยโปรแกรม LC solution (Shimadzu, Japan) และทำการเตรียมสารละลายมาตรฐาน และสารสกัดไซโลโอลิโกแซคคาไรด์เพื่อวิเคราะห์ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ทำการกรองด้วยตัวกรองไนลอนขนาด 0.45 ไมโครเมตร โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานไซโลไบโอส (X2) ไซโลไตรโอส (X3) และไซโลเตตระโอส (X4) ที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ในสารละลายไซโลโอลิโกแซคคาไรด์

กระบวนการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทชานอ้อยสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น ทางกล ทางเคมี การให้ความร้อน เป็นต้น (Kumar *et al*., 2009) งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการปรับสภาพโดยใช้สารเคมีที่เป็นด่างร่วมกับการให้ความร้อน เนื่องจากการใช้สารละลายด่างสามารถกำจัดลิกนินในโครงสร้างของชานอ้อยซึ่งจะขัดขวางการย่อยสลายไซแลนโดยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Cheng *et al*., 2008) อีกทั้ง

สารละลายด่างก่อให้เกิดสารพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการใช้สารละลายกรดและไม่ทำลายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส และการให้ความร้อนสูงทำให้โครงสร้างของชานอ้อยเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ดี (Hendriks *et al.*, 2009(

ผลการศึกษาปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์เมื่อทำการย่อยชานอ้อยผ่านการปรับสภาพแล้วด้วยสารละลายเอนไซม์ไซลาเนสหยาบซึ่งแสดงกิจกรรมเอนไซม์เท่ากับ 60.30 ยูนิตต่อมิลลิลิตร โดยวัดปริมาณน้ำตาลทั้งหมดด้วยวิธีฟีนอล-ซัลฟูริก และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี Dinitrosalicylic acid (DNS) ในสารสกัดไซโลโอลิโกแซค-คาไรด์ พบว่าปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์สูงสุดของตัวอย่างจากอัตราส่วนเอนไซม์ไซลาเนสหยาบ 50, 500, 1000 และ 2000 ยูนิตต่อกรัมชานอ้อย เท่ากับ 0.158, 0.207, 0.336 และ 0.352 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ โดยพบว่าอัตราส่วนที่ให้ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์สูงสุด คือ 2000 ยูนิตต่อกรัมชานอ้อย ที่เวลาการย่อย 9 ชั่วโมง รองลงมาคืออัตราส่วน 1000 500 และ 50 ยูนิตต่อกรัมชานอ้อย ตามลำดับ (Table 1) จากผลการทดลองเห็นได้ว่าความเข้มข้นของเอนไซม์ไซลาเนสมีผลโดยตรงต่อการย่อยสลายไซแลนเพื่อให้ได้เป็นน้ำตาลนอนรีดิวซ์ โดยไม่ขึ้นกับเวลาใดเวลาหนึ่ง โดยมีรายงานว่าการย่อยไซแลนเพื่อให้ได้เป็นไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเอนไซม์ ควรคำนึงถึงระยะเวลาที่เหมาะสม ไม่ควรใช้เวลานานเกินไปอาจทำให้ปริมาณไซโลโอลิโอแซคคาไรด์ที่ได้ลดลง เนื่องจากความสามารถการอุ้มน้ำของชานอ้อยทำให้บริเวณที่เอนไซม์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไซแลนได้ลดลง หรือเกิดจากประสิทธิภาพของเอนไซม์ลดลงเนื่องจากเกิดการยับยั้งของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Bian *et al.*, 2013) นอกจากนี้ไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้อาจเกิดการย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวคือ น้ำตาลไซโลส ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Christov et al. (1997) พบว่าเมื่อทำการย่อยไซโลโอลิโกแซคคาไรด์โดยใช้เอนไซม์ไซลาเนสจากรา *Aspergillus oryzae* MTCC 5154 และ *Geobacillus thermoleovorans* โดยใช้ไซแลนเป็นสารตั้งต้น พบว่าภายหลังการทำปฏิกิริยาผ่านไป 24 ชั่วโมง มีอัตราการผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ลดลง

Table 1 Non-reducing sugar content (g/L) of xylo-oligosaccharides extract at 3, 6, 9, 12, 15, 18 and 24 h by various ratio of xylanase 50, 500, 1000 and 2000 U/g of alkali-thermal pretreated sugarcane bagasse.

Time (h)	Non-reducing (g/L)			
	50 U/g	500 U/g	1000 U/g	2000 U/g
0	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.095	0.168	0.336	0.186
6	0.145	0.207	0.318	0.195
9	0.154	0.181	0.264	0.352
12	0.134	0.193	0.183	0.300
15	0.148	0.202	0.161	0.330
18	0.158	0.199	0.164	0.331
24	0.158	0.248	0.209	0.331

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีแบบแผ่นบาง)Thin-layer Chromatography, TLC)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ไซโลโอลิโกแซคคาไรด์จากชานอ้อยโดยเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน พบว่าการย่อยชานอ้อยผ่านการกำจัดลิกนินออกแล้วที่อัตราส่วนเอนไซม์ไซลาเนสหยาบ 50 ยูนิตต่อกรัมของชานอ้อย มีประสิทธิภาพการย่อยไซโลโอลิโกแซคไรด์ต่ำสุด เนื่องจากพบองค์ประกอบของ

สารละลายไซโลโอลิโกแซคคาไรด์มีลักษณะเป็นแถบสีจางและแคบกว่าในอัตราส่วนอื่น ขณะที่การย่อยที่อัตราส่วนเอนไซม์ไซลาเนสหยาบ 500, 1000 และ 2000 ยูนิตต่อกรัมของชานอ้อย พบแถบซึ่งมองเห็นชัดเจน โดยในทุกอัตราส่วนพบองค์ประกอบของน้ำตาลไซโลส (X1) ไซโลไบโอส (X2), ไซโลไทรโอส (X3) และไซโลเพนตาโอส (X5) ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน (Figure 1) โดยน้ำตาลไซโลสและไซโลไบโอสมีการแยกจากกันที่ไม่ชัดเจน เนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ไซลาเนสเป็นแบบสุ่มทำให้ในระหว่างการทำปฏิกิริยากับไซแลนองค์ประกอบน้ำตาลไซโลโอลิแซคคาไรด์ก็ถูกย่อยให้เป็นโมเลกุลที่เล็กลง โดยเกิดการย่อยจนถึงโมเลกุลที่เล็กที่สุดคือน้ำตาลไซโลส จากองค์ประกอบที่พบจากผลิตภัณฑ์ ไซโลไบโอสสามารถใช้ในอุตสาหกรรมยาเครื่องสำอาง และมีคุณสมบัติสารพรีไบโอติก (Koga et al., 1997) ไซโลเตตระโอสมีคุณสมบัติเป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลและเป็นสารเพิ่มความคงตัว (Peter and Glyn, 2016) นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับรายงานของธัญญรัตน์ (2561) ที่ทำการศึกษาคุณสมบัติการเป็นพรีไบโอติกของไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ที่สกัดจากแกลบเปรียบเทียบกับอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ พบว่าไซโลโอลิโกแซคคาไรด์สามารถกระตุ้นการเจริญของ *Bifidobacterium longum* ได้ดีกว่าฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์

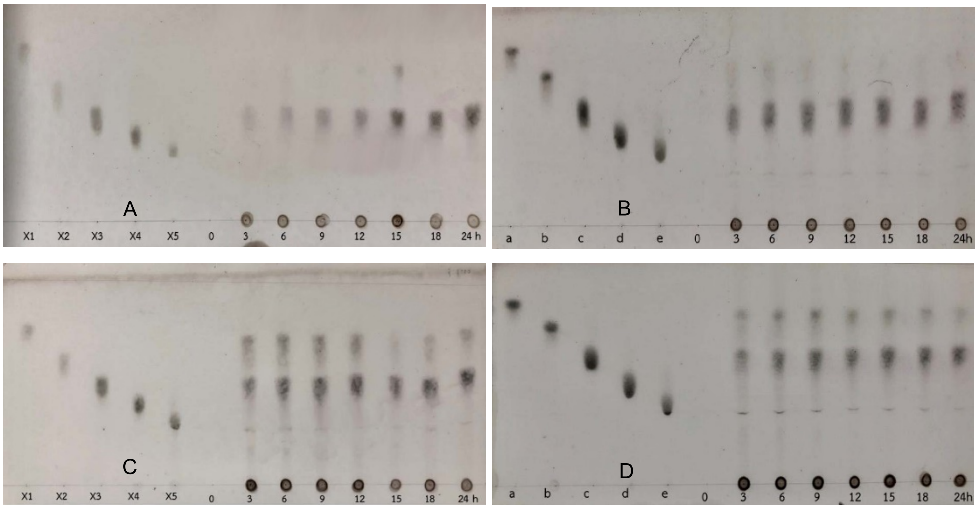


Figure 1 Components of the xylo-oligosaccharide extract at 3, 6, 9, 12, 15, 18 and 24 h by various ratio of crude xylanase 50 (A), 500 (B), 1000 (C) and 2000 (D) U/g of alkali-thermal pretreated sugarcane bagasse. on TLC. X1: xylose, X2: xylo-biose, X3: xylo-triose, X4: xylo-tetraose, X5: xylo-pentose.

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารสกัดโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)

การวิเคราะห์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของสารสกัดไซโลโอลิโกแซคคาไรด์จากการย่อยชานอ้อยผ่านการกำจัดลิกนินออกแล้วด้วยเอนไซม์ไซลาเนสหยาบจาก *T. fusca* PA 1-1 โดยเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานไซโลไบโอส (X2) ไซโลไตรโอส (X3) และไซโลเตตระโอส (X4) พบองค์ประกอบของสารละลายไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ทั้ง 3 ชนิดดังกล่าว ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค TLC

จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC พบองค์ประกอบของไซโลเตตระโอส (X4) สูงสุดในทุกช่วงเวลาการผลิต และสูงสุด ณ เวลา 24 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 86.50 จากองค์ประกอบที่พบทั้งสามชนิด ในเวลาที่ 3, 6, 9 และ 12 ชั่วโมงของการย่อย พบปริมาณไซโลไตรโอส (X3) สูงกว่าไซโลไบโอส (X2) แต่ภายหลังการย่อยที่ 12 จนถึง 24 ชั่วโมง พบไซโลไบโอส (X2) มีปริมาณสูงกว่าไซโลไตรโอส (X3) ซึ่งคาดว่าเกิดจากการย่อยจากไซโลโอลิโกเมอร์

ขนาด 3 โมเลกุลให้มีขนาดเล็กลงเป็น 2 โมเลกุล (Table 2) เนื่องจากโอลิโกเมอร์ของน้ำตาลไซโลส (DP = 2 ถึง 6) สามารถถูกเอนไซม์ไซลาเนสย่อยให้เป็นโมเลกุลที่เล็กลงแบบสุ่มได้จนถึง 1 โมเลกุล โดยเมื่อวิเคราะห์ปริมาณไซโลเตตระโอส (X4) ในแต่ละเวลา พบว่ามีปริมาณลดลงในชั่วโมงที่ 3 ถึง 9 และในเวลาที่ 12 ถึง 24 ชั่วโมงของการย่อย พบว่ามีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

Table 2 Composition of the XOS extract) 2000 U/g of alkali-thermal pretreated sugarcane bagasse (by HPLC analysis. X :2xylo-biose, X :3xylo-triose, X :4xylo-tetraose.

Time (h)	Composition of the XOS extract		
	X2 (mg/g)	X3 (mg/g)	X4 (mg/g)
3	22.246 (3.12%)	73.824 (10.34%)	617.573 (86.54%)
6	43.232 (4.91%)	109.369 (12.42%)	727.926 (82.67%)
9	62.636 (6.79%)	116.424 (12.63%)	743.064 (80.58%)
12	63.149 (7.50%)	87.344 (10.37%)	691.572 (82.13%)
15	70.472 (8.18%)	66.945 (7.77%)	723.826 (84.04%)
18	64.679 (8.12%)	46.893 (5.89%)	684.858 (85.99%)
24	92.869 (8.13%)	61.402 (5.38%)	988.065 (86.50%)

สรุป

การศึกษาการผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์จากการย่อยชานอ้อยผ่านการกำจัดลิกนินออกแล้วด้วยเอนไซม์ไซลาเนสหยาบจาก *T. fusca* PA 1-1 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง พีเอช 6 พบว่าการใช้เอนไซม์ไซลาเนสในอัตราส่วน 2000 ยูนิตต่อกรัมของชานอ้อยผ่านการกำจัดลิกนินออกแล้วให้ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์สูงที่สุด และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธี TLC และ HPLC พบว่ามีปริมาณของน้ำตาลไซโลส (X1) ไซโลไบโอส (X2) ไซโลไตรโอส (X3) และไซโลเตตระโอส (X4) ซึ่งมีปริมาณของไซโลเตตระโอส (X4) เป็นปริมาณสูงสุดในสามองค์ประกอบของไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ที่ผลิตได้ในงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

เครือมิตรผล. 2554. **ร่างหนังสือชี้ชวน: การประกอบธุรกิจของแต่ละสายผลิตภัณฑ์.** ส่วนที่ 1-4, หน้า 48

จักรกฤษณ์ เตชะอภัยคุณ, กนก รัตนะกนกชัย และ คิน เลย์ ยู. 2546. Cellulase-free Xylanase จาก Alkaliphilic Thermotolerant *Bacillus halodurans* สายพันธุ์ C-1 ต่อการย่อยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและเยื่อกระดาษคราฟท์ต่าง ๆ. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.** 26(2): 201-217.

ธัญญรัตน์ ศรีนรสิงห์, ณัฏฐา เลาหกุลจิตต์ และ อรพิน เกิดชูชื่น. 2561. คุณสมบัติพรีไบโอติกของไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์จากไซแลนของแกลบโดยไฮโดรไลซ์ด้วยกรด. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร.** 49(2): 21-24

เบญจวรรณ ยันต์เศษภักดี, สีหนาท ประสงค์สุข และ หรรษา ปุณณะพยัคฆ์. 2559. การผลิตไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (XOS) และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากธูปฤาษี (*Typha angustifolia* L.) ด้วยไซแลนเนสผลิตโดย *Aureobasidium*. **วารสารวิจัยมข. (บศ.)**. 16(1): 51-63.

รัชพล พะวงศ์รัตน์. 2558. กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. Science and Technology Silpakorn University สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. **Veridian E-Journal**. 2(1).

Apiraksakorn, J., S. Nitisinprasert and R.E. Levin. 2008. Grass degrading β-1, 3-1, 4-d-glucanases from *Bacillus subtilis* gn156: Purification and characterization of glucanase j1 and pj2 possessing extremely acidic pi. **Applied biochemistry and biotechnology**. 149: 53.

Bian, J., Peng, F., Peng, X. P., Peng, P., Xu, F., & Sun, R. C. (2013). Structural features and antioxidant activity of xylooligosaccharides enzymatically produced from sugarcane bagasse. **Bioresource technology**, 127: 236-241.

Cheng, K. K., Zhang, J. A., Ping, W. X., Ge, J. P., Zhou, Y. J., Ling, H. Z. and Xu, J. M. (2008). Sugarcane bagasse mild alkaline/oxidative pretreatment for ethanol production by alkaline recycle process. **Applied biochemistry and biotechnology**. 151(1): 43-50.

Choi, J.-H., Park, H., Park, C., Wang, N.-H. L., & Mun, S. (2016). Highly efficient recovery of xylo-biose from xylo-oligosaccharides using a simulated moving bed method. **Journal of Chromatography A**. 1465, 143-154.

Christov LP, Myburgh J, van Tonder A, Prior. And BA. Hydrolysis of extracted and fibre-bound xylan with Aureobasidium pullulans enzymes. **J Biotechnol**. 1997; 55(1): 21-29.

Dubois, M., K.A. Gilles, J.K. Hamilton, P.t. Rebers and F. Smith. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical chemistry**. 28: 350-356.

Hendriks, A. T. W. M. and Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource technology**. 100(1): 10-18.

Lee, S.-C., S.-J. Lee, S.-H. Kim, I.-H. Park, Y.-S. Lee, S.-Y. Chung and Y.-L. Choi. 2008. Characterization of new biosurfactant produced by *Klebsiella* sp. Y6 - 1 isolated from waste soybean oil. **Bioresource Technology**. 99: 2288-2292.

Miller, G. 1959. Modified DNS method for reducing sugars. **Analytical Chemistry**. 31: 426-428.

Nascimento, R., R. Coelho, S. Marques, L. Alves, F. Gırio, E. Bon and M. Amaral-Collaço. 2002. Production and partial characterization of xylanase from *Streptomyces* sp. Strain amt-3 isolated from brazilian cerrado soil. **Enzyme and Microbial Technology**. 31: 549-555.

Peter, A.W. and Glyn O.P. 2016. **Gum and Stabilisers for the Food Industry (18): Hydrocolloid Functionality for Affordable and Sustainable Global Food Solutions.** Glyndwr University. CPI Group (UK) Ltd, Croydon, UK.

Koga, K., Kobayashi, T., Fujikawa, S. and Sawada, M. 1997. **Skin preparation for external use.** U.S. Patent No. 5,660,838. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J. and Stroeve, P. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. **Industrial & engineering chemistry research.** 48(8): 3713-3729.

Effect of Calcium Concentration on Properties of Tapioca Starch Gel Containing Alginate

Duanggamol Jullapanya[1], Pattharasuda Hanucharoenkul[1] and Rungnaphar Pongsawatmanit[1*]

ABSTRACT

The gelation of alginate with different concentrations of calcium ion plays an important role in controlling the properties of starch gel soaked in the syrup. The influence of calcium concentration on the quality of tapioca starch (TS) gel containing alginate was investigated. The TS gel containing 2% alginate (36.5% total polysaccharide concentration) was prepared by mixing the starch and hydrocolloids with water, extruding the dough through stainless steel round decorating tip (4 mm diameter) in boiled water to gelatinize the starch. The gels were then soaked in 2, 4 and 6% w/w calcium solutions for 5 min and further cooling in water (5±3ºC) prior to cutting into 4 cm length. Then TS gel samples were soaked in syrups (20% and 30% sucrose) with mixing ratio of 1:4 and kept at 5ºC for 3 days. The diameter and total soluble solid of the gels increased with increasing storage time. The TS gels with soaking in calcium solution revealed lower diameters than those without soaking expected from the gel formation of alginate and calcium ion forming egg box in the starch gel and preventing the expansion of the starch gel due to the limited diffusion of water molecules into the starch matrix. The moisture contents of all TS gels decreased with increasing storage time and calcium concentration. Therefore, soaking TS gels containing 2% alginate in calcium solution could decrease the gel diameter, TSS values and moisture content.

Key words: tapioca starch gel, calcium, sucrose syrup and hydrocolloid

* Corresponding author; e-mail address: fagiruw@ku.ac.th

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Tapioca starch (TS), produced from cassava roots, is widely used in food formation acting as thickening or gelling agents due to high viscosity, clear appearance, good gel stability with low production cost compared with other starches (Pongsawatmanit *et al*., 2006). The TS-based gel formation reveals a soft and transparent appearance leading to be used in many products such as puddings, soups and baby food products. In some dessert products such as cendol (tapioca starch gel in coconut milk) or starch pearls in bubble tea, TS gel is used by soaking in the syrup to create a new product. However, the changes in the quality of TS gel were observed during storage after soaking in the syrup such as softer texture and higher gel diameter. Hydrocolloids have been used in the food industry to improve or to maintain the overall quality of the gel during distribution and storage (Pongsawatmanit *et al*., 2007). Starch/hydrocolloid mixture is popularly used as a texture modifier. There are many hydrocolloids that act as gelling agents such as agar, carrageenan and alginate (Saha and Bhattacharya, 2010). Alginate is an anionic polymer obtained from brown seaweed and mostly used in many products acting as a thickening agent but could form mild gelation by addition of divalent cations such as Ca^{2+} (Gombotz and Wee, 1998). Calcium-induced gelation of alginate results from the interactions between calcium ions and guluronate blocks in alginate molecules called ‘egg-box’ model (Fang *et al*., 2008). Alginate gel formation could be obtained by dropping sodium or potassium alginate solution into an aqueous solution of calcium ions such as calcium chloride ($CaCl_2$) solution. The gelation rate of alginate with $CaCl_2$ affects on cross-link density within the gel (Kuo and Ma, 2001). In this study, the TS gel containing fixed alginate content was prepared to investigate the effect of soaking the gel in different calcium concentrations on TS gel quality prior to preserve in the syrups (20% and 30% sucrose). The results obtained from this study are expected to gain more understanding for further application of controlling the texture and diameter of starch gel soaked in the syrup during storage.

MATERIALS AND METHODS

1. Materials

The TS (Siam Modified Starch, Pathumthani, Thailand), sodium alginate (DuPont Nutrition Ireland, Cork, Ireland), white sugar (Mitphol Co., Ltd., Thailand) and calcium lactate (Corbion Purac Ltd., Rayong, Thailand) were used without further purification.

2. Preparation of tapioca starch gel

The TS gels containing 2% w/w alginate and 6% mixture of potato starch (Mcgarrett®), xanthan gum (CP Kelco, San Diego, USA) and glucomannan (Sichuan Newstar Konjac Co., Ltd., China) (36.5% total polysaccharide concentration) were prepared. All polysaccharides were dry-mixed homogeneously and sieved through 60-mesh sieve. Water was slowly added to the mixture and mixed

using hand mixer with the lowest speed until homogeneous dough obtained (30-40 min). Then the dough mixture was transferred into a plastic bag (air-tight) and left at room temperature for 30 min to ensure the fully hydration of the polysaccharides. The dough was extruded through stainless steel round decorating tip (4 mm diameter) into boiling water to gelatinize the starch. The floating starch gel were further heated for 3 min, then removed to soak in 2, 4 and 6% w/w calcium solutions (5-10°C) (the ratio of starch gel to calcium solution = 1:5 w/w) for 5 min and further cooling in water (5±3ºC) twice for 2 min each prior to cutting into 4 cm length. The 4 cm-length gel (cylinder shape) was put into a 150 ml bottle. The syrups (20% and 30% sucrose) were then added with the ratio of starch gel to syrup of 1:4 w/w. All bottles were kept at 5°C for 3 days and sampled out for quality measurement.

3. Quality measurement of the gel properties

Diameter: The diameter of TS gels was measured using a Vernier caliper. Five samples of each TS gel with and without calcium soaking were measured at three different positions and recorded as a mean value (modified from Wang *et al*., 2013).

Total soluble solid (TSS): TS gel samples were sampled, washed with distilled water for 10 s and placed on tissue paper for adsorbing excess water on the surface of TS gels. Then the gels were mixed with distilled water (starch gel : water = 1:2), blended using blender, and filtrated. The TSS of the filtrate was measured using a refractometer (Atago, Osaka, Japan) and then was multiplied by 3 (the dilution factor) to get the TSS of the starch gel.

Moisture content: The moisture contents of the TS gels with and without calcium soaking was determined using a hot air oven method at 105°C until constant weight obtained (AOAC, 2000).

Firmness measurement: Firmness evaluation was carried out using texture analyzer (TA-XT Plus, Stable Micro System, UK) according to (Graybosch *et al*., 2004). TS gel samples (3 samples) with a length of 4 cm (cylinder shape) were sampled out from the storage at 5ºC to measure firmness using Warner-Bratzler blade probe set (flat blade). The diameters of TS gels with and without soaking calcium were reported in Figure 1 depending on the storage time and soaking solutions. Each TS gel was cut to failure using a speed of 0.5 mm/sec, pre-speed and post-speed tests were 1 and 10 mm/sec, respectively. Firmness was measured as the peak force of the curve. Four measurements were performed for each TS gel with soaking in different calcium concentration.

4. Statistical analysis

All experiments were carried out using at least two freshly prepared samples. The results are reported as the mean and standard deviation. Duncan's multiple range test (DMRT) was applied to determine significant differences at the 5% level of significance (P < 0.05) between the treatment parameters.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Diameter of TS gels containing alginate in syrups with presoaking in different calcium concentrations

The diameter of TS gels increased with increasing the storage time at 5°C for both samples soaking in 20% and 30%syrup. The gels soaking in the calcium solution showed the lower values of diameter compared with that without soaking (Figure 1). Calcium is correlated with the stability cross-linking density in the TS gel containing alginate (Wichchukit *et al.*, 2013) leading to the calcium-induced gelation of alginate called 'egg-box' model (Fang *et al.*, 2008). The decrease in the swelling of TS gels was expected from an increase in crosslinking density with increasing Ca^{2+} concentration. The diameters of the TS gel were also affected by the Ca^{2+} concentration. The first and second days of storage showed that the diameter of the gel decreased with increasing Ca^{2+} concentration in soaking solution suggesting that Ca^{2+} concentration affecting the swelling of the TS gel structure during soaking in 20% and 30% syrup for 3 days. The diameters of TS gels in 30% syrup were lower than those in the 20% syrup expected from the amount of higher sucrose molecules diffusing through the gel structure and lower the water molecules to enhance the swelling of the gel during storage and by the effect of sugar affecting the stiffness of the gel (Dickinson, 2006).

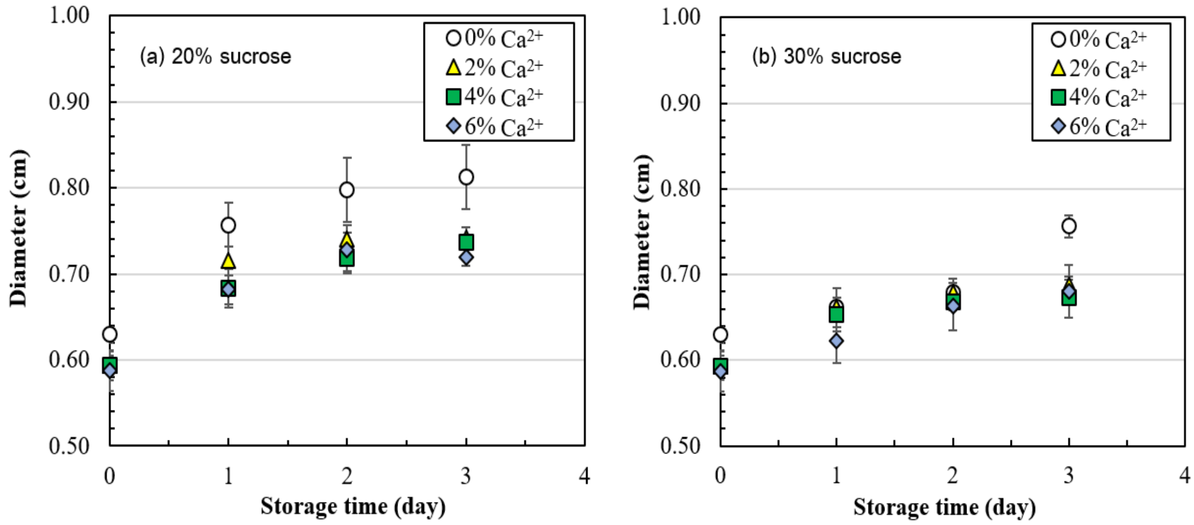


Figure 1 Diameters of TS gels containing alginate in 20% syrup (a) and 30% syrup (b) during storage at 5°C for 0, 1, 2, and 3 days with and without presoaking in calcium concentration (0, 2, 4 and 6% w/w).

2. Total soluble solid and moisture content of the TS gels containing alginate in syrups with presoaking in different calcium concentrations

Total soluble solids of TS gels containing alginate in 20% syrup (a) and 30% syrup (b) during storage at 5°C for 0, 1, 2, and 3 days with and without presoaking in calcium concentration (0, 2, 4 and 6%w/w) are shown in Figure 2. The results showed that the presoaking in calcium solutions affect the TSS value of TS gels containing alginate. Without presoaking in calcium solutions, the TSS values were higher than those with calcium presoaking expected from the loose polymer network structure leading to higher diffusion of sugar molecules. The TSS values of TS gels in 30% syrup (Figure 2b) were higher than those in 20% syrup (Figure 2a) expected from the higher concentration gradient of sucrose molecules in the systems and leading to the lower moisture content in the gels (Table 1). The moisture content of freshly prepared TS gels (Table 1) without presoaking calcium solution was higher than those obtained from calcium presoaking treatment. The moisture contents of the gels decreased with increasing syrup concentration expected from the higher dehydration effect from the colligative properties of the higher syrup concentration (Udomkun *et al*., 2014). However, the moisture contents of the TS gels decreased with increasing storage time in the initial stage expected from the diffusion of the sugar molecules into the starch gels and higher TSS values (Figure 2).

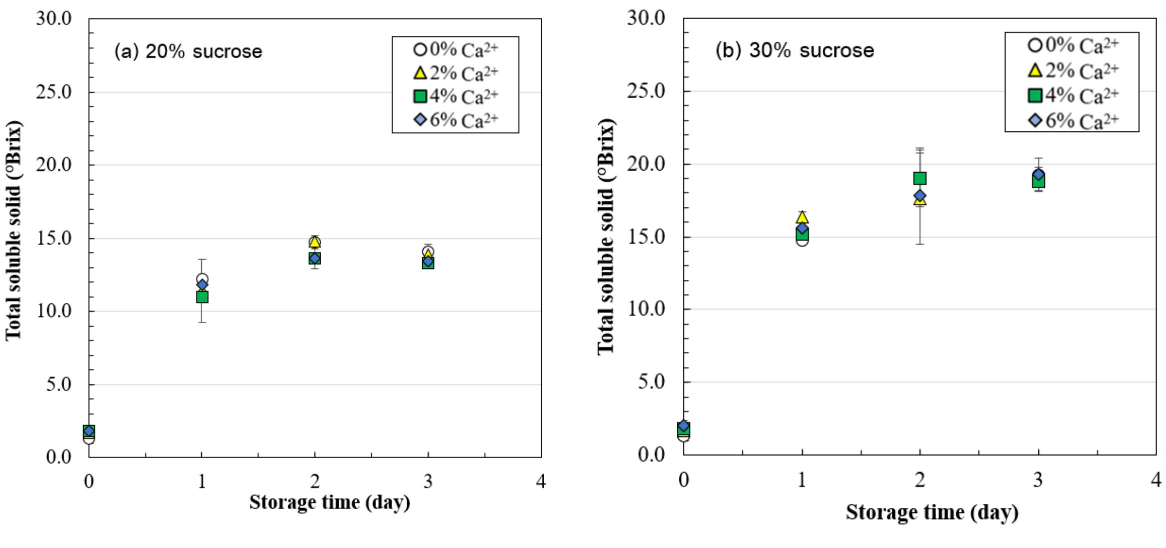


Figure 2 Total soluble solids of TS gels containing alginate in 20% syrup (a) and 30% syrup (b) during storage at 5°C for 0, 1, 2, and 3 days with and without presoaking in calcium concentration (0, 2, 4 and 6%w/w).

3. Firmness of the gels

Firmness values of TS gels containing alginate in 20% and 30% syrups during storage at 5°C for 0, 1, 2, and 3 days with and without presoaking in calcium concentration (0, 2, 4 and 6%w/w) are shown in Figure 3.

Table 1 The moisture contents of TS gels containing alginate in 20% and 30% syrup during storage at 5°C for 0, 1 and 2 days with and without presoaking in calcium concentration (0, 2, 4 and 6%w/w)

Syrup	Calcium	Moisture content (% wb) at storage day		
(%)	(%)	0	1	2
20	0	81.4±2.1^{a}	75.7±1.1^{a}	73.2±0.1^{a}
	2	78.6±0.4^{b}	74.5±0.1^{b}	73.2±0.1^{a}
	4	78.3±0.8^{b}	74.5±0.1^{b}	71.7±1.1^{b}
	6	77.9±0.3^{b}	74.2±0.1^{b}	72.7±0.5^{ab}
30	0	80.5±2.4^{a}	68.3±0.9^{a}	64.5±1.0^{a}
	2	78.8±0.5^{b}	70.0±4.5^{a}	63.8±0.8^{a}
	4	78.6±0.9^{b}	67.6±1.3^{a}	63.8±0.4^{a}
	6	77.2±1.4^{b}	66.4±0.7^{a}	66.6±5.8^{a}

Mean ± standard deviation (n=3) values followed by a different lowercase letter within the same column are significantly different (p<0.05) using Duncan's multiple range test.

The firmness of the TS gels without presoaking in calcium solution showed the lowest values for both 20% and 30% syrup. The firmness of the starch gel increased with increasing calcium solution expected from the gelation forming of alginate in the system. The firmness of the starch gel soaking in 20% syrup decreased with increasing storage time whereas the TS gels in 30% syrup did not show the same trend for the gels with presoaking in calcium lactate solution suggesting that the calcium-induce gelation of alginate in TS gel in 30% syrup could retard the swelling of the gels in solutions after storage (lower diameter in Figure 1). In addition, higher TSS indicating higher sugar content (Figure 2) in the gels could strengthen the starch network (Hedayati *et al.*, 2016) in the gels soaking in higher syrup concentration.

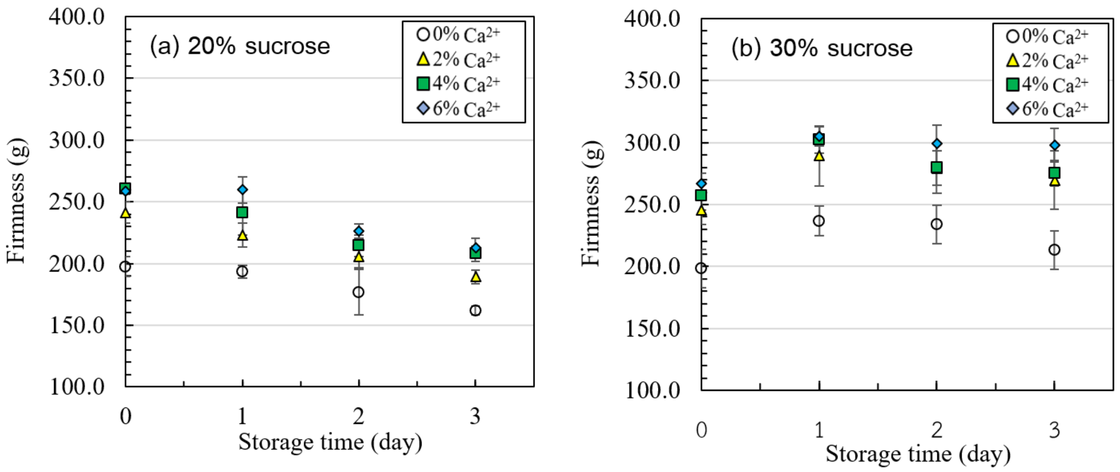


Figure 3 The firmness of TS gels containing alginate in 20% syrup (a) and 30% syrup (b) during storage at 5°C for 0, 1, 2, and 3 days with and without presoaking in calcium concentration (0, 2, 4 and 6%w/w).

CONCLUSION

The diameters, TSS and moisture contents of TS gels decreased with increasing calcium concentration for presoaking treatment. The firmness of the starch gel increased with increasing calcium concentration. The properties of TS gel containing alginate could be modified due to the gel formation induced by calcium ion and alginate. However, the TS gels in different syrup concentrations should be further investigated due to the structure-function relationship among the starch-hydrocolloid-sugar molecules.

REFERENCES

Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 2000. **Official Methods of Analysis Association of Official Analytical Chemists.** 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg.

Dickinson, E. 2006. Structure formation in casein-based gels, foams, and emulsions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 288(1-3): 3-11.

Fang, Y., S. Al-Assaf, G.O. Phillips, K. Nishinari, T. Funami and P.A. Williams. 2008. Binding behavior of calcium to polyuronates: comparison of pectin with alginate. **Carbohydrate Polymers** 72(2): 334-341.

Gombotz, W.R. and S. Wee.1998. Protein release from alginate matrices. **Advanced Drug Delivery Reviews.** 31(3): 267-285.

Graybosch, R., N. Ames, P.S. Baenziger, and C.J. Peterson. 2004. Genotypic and environmental modification of Asian noodle quality of hard winter wheats. **Cereal Chemistry** 81(1): 19-25.

Hedayati, S., F. Shahidi. A. Koocheki, A. Farahnaky and M. Majzoobi. 2016. Comparing the effects of sucrose and glucose on functional properties of pregelatinized maize starch. **International Journal of Biological Macromolecules**. 88: 499-504.

Kuo, C.K. and P.X. Ma 2001. Ionically crosslinked alginate hydrogels as scaffolds for tissue engineering: Part 1. Structure, gelation rate and mechanical properties. **Biomaterials**. 22(6): 511-521.

Pongsawatmanit, R., T. Temsiripong and T. Suwonsichon. 2007. Thermal and rheological properties of tapioca starch and xyloglucan mixtures in the presence of sucrose. **Food Research International**. 40(2): 239-248.

Pongsawatmanit, R., T. Temsiripong, S. Ikeda and K. Nishinari. 2006. Influence of tamarind seed xyloglucan on rheological properties and thermal stability of tapioca starch. **Journal of Food Engineering**. 77(1): 41-50.

Saha, D. and S. Bhattacharya. 2010. Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: A critical review. **Journal of Food Science and Technology**. 47(6): 587-597.

Udomkun, P., B. Mahayothee, M. Nagle and J. Müller. 2014. Effects of calcium chloride and calcium lactate applications with osmotic pretreatment on physicochemical aspects and consumer acceptances of dried papaya. **International Journal of Food Science and Technology**. 49(4): 1122-1131.

Wang, Y., M. Zhang and A.S. Mujumdar. 2013. Effect of cassava starch gel, fish gel and mixed gels and thermal treatment on structure development and various quality parameters in microwave vacuum-dried gel slices**. Food Hydrocolloids**. 33(1): 26-37.

Wichchukit, S., M.H. Oztop, M.J. McCarthy and K.L. McCarthy. 2013. Whey protein/alginate beads as carriers of a bioactive component. **Food Hydrocolloids.** 33(1): 66-73.

การศึกษาปริมาณสารเพิ่มความหนืด ขนาดและปริมาณเนื้อลำไยที่เหมาะสม ในเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่มสำหรับผู้สูงอายุ

A Study of the Concentrations of Thickening Agent, the Size and Quantity of Longan Pulp in Longan Tea Mixed with Herb for Elderly Consumers

อนุวัตร แจ้งชัด[1*] พรรณนิภา ศิริพันธ์[1] กมลวรรณ แจ้งชัด[1] สายน้ำผึ้ง ทองใส[2] และ วรรณนารัตน์ ลีสุขสวัสดิ์[2]

Anuvat Jangchud[1*], Phannipha Siriphunt[1], Kamolwan Jangchud[1] Saynamphung Tongsai[2] and Wannarat Leesuksawat[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปริมาณสารเพิ่มความหนืดเพื่อทำการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเครื่องดื่ม ชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่ม พร้อมทั้งศึกษาขนาดและปริมาณของเนื้อลำไยที่มีต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณสารเพิ่มความหนืดที่ร้อยละ 1.2 มีผลทำให้ชาลำไยผสมสมุนไพรมีค่าความหนืด เท่ากับ 50.75 เซนติพอยซ์ ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสำหรับผู้มีภาวะการกลืนลำบากขั้นต้น โดยผู้บริโภคจะให้คะแนนความชอบสูง เมื่อชาลำไยผสมสมุนไพรมีเนื้อลำไยที่มีขนาด 1/2 ลูก (1.70 กรัม หรือ ปริมาณ 2 ชิ้น) อยู่ในน้ำชาปริมาตร 40 มิลลิลิตร ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ชาลำไยผสมสมุนไพรที่พัฒนาได้มีสารต้านอนุมูลอิสระ และมีผลการประเมินทางจุลินทรีย์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด โดยได้รับคะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก (7.2) และได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคร้อยละ 93

ABSTRACT

This research was aimed to study the concentrations of thickening agent to improve the texture properties of Longan tea mixed with herbs and Longan pulp for people with Dysphagia. The size of Longan pulps was also investigated together with the quantity of the pulps for sensory evaluation. The results showed that the addition of 1.2% thickening agent resulting in the viscosity of Longan tea solution mixed with herbs at the level of 50.75 cP, which was suitable for the people who have primary Dysphagia. The addition of 1/2 Longan pulp (1.70 g or 2 pieces) in 40 ml tea solution mixed with herbs provided high sensory liking scores. The developed Longan tea mixed with herbs and Longan pulp contained antioxidant activity and microbiologically safe under standards required for instant tea mix products.The product received liking scores at like moderately scores (7.2) and 93% consumer acceptance.

Key words :dysphagia, herb, longan, tea

*Corresponding author; e-mail address :fagiavj@ku.ac.th

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]สาขาวิชามนุษยนิเวศศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช นนทบุรี 11120

[2]School of Human Ecology, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi 11120

คำนำ

ชาสมุนไพร เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากส่วนต่างๆ ของพืชซึ่งมิได้แปรสภาพ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำไปบริโภคโดยการต้มหรือชงกับน้ำ นอกจากนี้ชาสมุนไพรยังถูกจัดเป็นอาหารที่กำหนดคุณภาพหรือมาตรฐาน โดยต้องมีส่วนของสมุนไพรร้อยละ 90 ขึ้นไป ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 280 พ.ศ. 2547 โดยลำไยถูกจัดให้เป็นหนึ่งในสมุนไพรที่ได้รับความนิยมนำมาทำเป็นเครื่องดื่ม เนื่องจากให้รสชาติที่หวานตามธรรมชาติ และเมื่อผสมร่วมกับสมุนไพรชนิดอื่นทำให้บริโภคได้ง่ายมากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นลำไยยังประกอบด้วยสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ในกลุ่มสารประกอบพอลิฟีนอลิก ได้แก่ กรดแกลลิก (Gallic acid) สารคอริลาจิน (Corilagin) และกรดเอลลาจิก (Ellagic acid) (Rangkadilok *et al*., 2005) และยังมีวิตามินซีสูงเมื่อเปรียบเทียบกับลิ้นจี่และเงาะ รวมถึงยังเป็นแหล่งของแร่ธาตุโพแทสเซียมและทองแดง (Wall, 2006) โดยเครื่องดื่มชายังเป็นของเหลวที่ไม่มีความหนืดหรือมีความหนืดเพียงเล็กน้อย ทำให้ไหลลงคอได้อย่างรวดเร็ว จึงเป็นปัญหาสำหรับผู้มีภาวะกลืนลำบาก ที่ไม่สามารถควบคุมระบบการกลืนได้อย่างปกติ ทำให้เกิดการสำลักและอาจก่อให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้ โดยส่วนใหญ่ผู้สูงอายุจะพบปัญหาภาวะการกลืนลำบาก เนื่องจากระบบการทำงานของร่างกายเกิดการเสื่อมสภาพลงจึงทำให้การกลืนอาหารเป็นไปได้ยากขึ้น (ปิยะภัทร, 2556; ศศุภางค์, 2557) การปรับอาหารหรือการเลือกชนิดอาหารเพื่อใช้ในการฝึกกลืนอย่างเหมาะสม ถือเป็นแนวทางการรักษาภาวะกลืนลำบากในผู้สูงอายุที่สำคัญที่สุด เพราะหากผู้มีภาวะกลืนลำบากได้รับน้ำไม่เพียงพอ อาจทำให้เกิดภาวะขาดน้ำได้ ดังนั้นผู้มีภาวะดังกล่าวควรได้รับปริมาณน้ำอย่างเพียงพอ แต่หากไม่สามารถกลืนน้ำได้อย่างปกติ ก็สามารถเลือกดื่มเครื่องดื่มหรือของเหลวอื่นๆ ที่มีลักษณะข้นหนืดมากกว่าน้ำ หรืออาจใช้สารเพิ่มความหนืดผสมลงในเครื่องดื่มตามระดับที่เหมาะสมต่อการกลืน เพื่อเป็นการป้องกันการสำลักและภาวะขาดน้ำที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการพัฒนาเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่มให้มีลักษณะความหนืดใกล้เคียงกับน้ำเชื่อม (Nectar-like liquids) เพื่อให้เหมาะสำหรับผู้มีภาวะกลืนลำบากขั้นต้น พร้อมทั้งศึกษาขนาดและปริมาณเนื้อลำไยอบแห้งที่เหมาะสมต่อการบริโภคเพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่มีภาวะกลืนลำบากซึ่งคาดว่าจะเหมาะสำหรับผู้สูงอายุ

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่ม

ผงเนื้อลำไยอบแห้ง ผงเมล็ดลำไยอบแห้ง (*Dimocarpus longan*) ผงสมุนไพรรวม 9 ชนิด (เจียวกู่หลาน ชะเอมเทศ ตะไคร้แกง เตยหอม พลูคาว ใบหม่อน เห็ดหลินจือ กระชายดำ เถาวัลย์เปรียง) ที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 เมช หรือ 425 ไมโครเมตร และผงหญ้าหวาน จากบริษัท สวนกนกอัณณ์ จำกัด และวัตถุเจือปนอาหารสำหรับปรับความหนืด (มีส่วนประกอบ มอลโตเดกซ์ตริน แซนแทนกัม และโพแทสเซียมคลอไรด์) ยี่ห้อรีซอร์ส ทิคเค่น อัพ เคลียร์ จากบริษัท เนสท์เล่ (ไทย) จำกัด

1. การศึกษาปริมาณสารเพิ่มความหนืดที่มีผลต่อลักษณะทางด้านความหนืดของเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่มที่เหมาะสม

ศึกษาปริมาณสารเพิ่มความหนืด ยี่ห้อรีซอร์ส ทิคเค่น อัพ เคลียร์ ในชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่ม ที่ 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0, 0.6 และ 1.2 (W/V) โดยทำการเตรียมน้ำชาจากผงชาลำไยผสมสมุนไพร อัตราส่วนผงต่อ

น้ำเท่ากับ 1 : 40 (ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (°C) เป็นเวลา 4 นาที) จากนั้นนำไปวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield รุ่น DV III Ultra ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

2. การศึกษาขนาดและปริมาณของเนื้อลำไยที่เหมาะสมต่อการบริโภคเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบซงดื่ม

ศึกษาขนาดของเนื้อลำไยอบแห้ง (คัดเลือกน้ำหนัก 1.70 ± 0.02 กรัม) 3 ระดับ คือ ขนาด 1 ลูก 1/2 ลูก (2 ชิ้น) และ 1/4 ลูก (4 ชิ้น) ของผลเนื้อลำไยอบแห้งต่อปริมาตรน้ำชาลำไยผสมสมุนไพร 40 มิลลิลิตร โดยคัดเลือกเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบซงดื่มที่มีความหนืดใกล้เคียงกับเครื่องดื่มประเภท Nectar-like liquids จากการศึกษาในข้อที่ 1 ทำการทดสอบประสาทสัมผัสทางด้านความชอบโดยให้ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบที่มีต่อคุณลักษณะทางด้านลักษณะปรากฏ สีน้ำชา สีเนื้อลำไย ขนาดเนื้อลำไย ปริมาณเนื้อลำไย กลิ่น กลิ่นรสลำไย รสหวานและความชอบโดยรวม ด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scale ร่วมกับการทดสอบความพอดี (Just about right) ด้านขนาดของเนื้อลำไย ปริมาณของเนื้อลำไย และกลิ่นรสลำไยของน้ำชา โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนที่มีอายุตั้งแต่ 60 ปี ขึ้นไป จำนวน 30 คน

3. การศึกษาคุณภาพทางด้านกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยาของเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบซงดื่มที่พัฒนาได้

วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบซงดื่มที่พัฒนาได้โดยวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ การวัดค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ในระบบ CIE L* a* b* และค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (aw) วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัด Aqualab ในขณะที่การวิเคราะห์ค่าทางเคมีจะวิเคราะห์ฤทธิ์ความสามารถในสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay และวิธี ABTS assay (mmol Trolox/100 g dry weight (DW)) วิธี Ferric Reducing Ability Power (FRAP: mg FeSO4/100 g DW) และวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content, TPC) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteau (g GAE/100 g DW) สำหรับคุณภาพทางจุลชีววิทยา ทำการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด คอลิฟอร์ม ยีสต์และรา เทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลิตภัณฑ์สมุนไพรรวมแห้งชงดื่ม (มผช. 996/2556)

4. การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบซงดื่ม

ทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้ ด้วยการให้ผู้บริโภคทดสอบตัวอย่างผลิตภัณฑ์พร้อมทั้งตอบแบบสอบถามในด้านความชอบและการยอมรับผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบซงดื่มกับผู้บริโภคที่มีอายุตั้งแต่ 60 ปีขึ้นไป จำนวน 100 คน

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA (analysis of variance) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan’s New Multiple Range Test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (SPSS for Windows version 12)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การศึกษาปริมาณสารเพิ่มความหนืดที่มีผลต่อลักษณะทางด้านความหนืดของเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่มที่เหมาะสม

จากการศึกษาปริมาณสารเพิ่มความหนืด 3 ระดับ คือร้อยละ 0, 0.6 และ 1.2 (w/v) ที่มีผลต่อค่าความหนืดของน้ำชาลำไยผสมสมุนไพร แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า น้ำชาลำไยผสมสมุนไพรที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความหนืดมีค่าความหนืด 0.85 ± 0.23 เซนติพอยซ์ ซึ่งมากกว่าความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน โดยน้ำที่อุณหภูมิ 60 และ 80 °C มีความหนืด 0.469 และ 0.357 เซนติพอยซ์ ตามลำดับ (ธัญดร, 2553) เมื่อปริมาณสารเพิ่มความหนืดมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของน้ำชาเพิ่มขึ้น โดยการเติมสารเพิ่มความหนืดที่ระดับร้อยละ 1.2 (w/v) เป็นปริมาณที่ระบุตามฉลากว่ามีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำเชื่อม (Nectar-like liquids) ซึ่งจากการกำหนดของ National Dysphagia Diet: Standardization for Optimal Care (National Dysphagia Diet Task Force, 2002) ระบุว่าของเหลวที่จัดเป็นแบบเนกตาร์จะมีความหนืดอยู่ในช่วงระหว่าง 51 – 350 เซนติพอยซ์ ซึ่งเครื่องดื่มหรือของเหลวที่มีความหนืดอยู่ในระดับนี้สามารถปรับปรุงและมีความเหมาะสมสำหรับผู้มีภาวะกลืนลำบาก ทำให้ลดความเสี่ยงที่จะเกิดการสำลักได้ ซึ่งช่วงของค่าความหนืดดังกล่าวตรงกับปริมาณการใช้สารเพิ่มความหนืดที่ระดับร้อยละ 1.2 ดังแสดง Table 1

Table 1 Viscosity of Longan tea mixed with herbs by various concentration of thickening agents.

Concentration%) (w/v)	Viscosity (cP)
0	0.85 ± 0.23
0.6	27.00 ± 1.98
1.2	50.75 ± 0.07

2. การศึกษาขนาดและปริมาณของเนื้อลำไยที่เหมาะสมต่อการบริโภคเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่ม

จากการศึกษาขนาดและปริมาณของเนื้อลำไยอบแห้ง 3 ระดับ คือ ขนาด 1 ลูก 1/2 ลูก (2 ชิ้น) และ 1/4 ลูก (4 ชิ้น) ต่อลักษณะประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สี ขนาดเนื้อลำไย ปริมาณเนื้อลำไย กลิ่น ความหวาน กลิ่นรสลำไย และความชอบโดยรวมของน้ำชาลำไยผสมสมุนไพร (Table 2) พบว่าตัวอย่างน้ำชาลำไยผสมสมุนไพร ที่มีเนื้อลำไยอบแห้งได้รับคะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านสี กลิ่นและความชอบโดยรวมมากกว่าตัวอย่างน้ำชาลำไยผสมสมุนไพรที่ไม่มีเนื้อลำไยอบแห้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยผู้ทดสอบให้ความเห็นว่าการรับประทานน้ำชาพร้อมเนื้อลำไยอบแห้งสามารถเสริมกลิ่นรสลำไยของน้ำชาให้มากขึ้นได้ เมื่อพิจารณาตัวอย่างน้ำชาลำไยผสมสมุนไพรที่มีเนื้อลำไยอบแห้งขนาดต่างๆ ผสมอยู่ พบว่าตัวอย่างน้ำชาที่มีเนื้อลำไยอบแห้งขนาด 1/2 ลูก (2 ชิ้น) และ 1 ลูก ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏและขนาดมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่มีคุณลักษณะทางด้านสี ปริมาณเนื้อลำไย กลิ่น ความหวาน กลิ่นรสและความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p >

0.05) ตัวอย่างน้ำชาลำไยผสมสมุนไพรที่มีเนื้อลำไยขนาด 1/2 ลูก (2 ชิ้น) ผู้ทดสอบให้ความเห็นว่ามีความพอดีที่สุด (ร้อยละ 70)

Table 2 Mean sensory liking scores of Longan tea mixed with herbs and Longan pulp by various size of dry Longan pulp.

Sensory attributes	Longan pulp			
	None	Size1/4 (4 pieces)	Size 1/2 (2 pieces)	1 fruit
Appearance	6.2 ± 1.3^{b}	6.5 ± 1.3^{b}	7.3 ± 0.8^{a}	7.3 ± 0.8^{a}
Color of tea	5.7 ± 1.4^{b}	6.8 ± 1.4^{a}	7.3 ± 0.9^{a}	7.2 ± 0.9^{a}
Size of Longan	-	5.8 ± 1.4^{b}	6.5 ± 1.0^{a}	6.6 ± 1.1^{a}
Amount of Longan pulp	-	6.7 ± 0.9^{a}	6.8 ± 1.1^{a}	6.4 ± 1.0^{a}
Odor	6.4 ± 1.1^{b}	6.6 ± 1.1^{ab}	6.9 ± 1.0^{a}	6.7 ± 1.0^{ab}
Sweetness	-	6.9 ± 1.3^{a}	7.1 ± 1.2^{a}	7.0 ± 1.2^{a}
Longan flavor	-	7.2 ± 1.0^{a}	6.9 ± 0.9^{a}	7.0 ± 1.0^{a}
Overall liking	5.7 ± 1.2^{b}	6.8 ± 0.8^{a}	7.0 ± 0.9^{a}	6.8 ± 0.8^{a}

^{a,b} Different letters in the same row indicated significant difference ($p \leq 0.05$)

3. การศึกษาคุณภาพทางด้านกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่มที่พัฒนาได้

ผลการวิเคราะห์คุณภาพเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่มที่มีการเติมสารให้ความหนืดที่ระดับร้อยละ 1.2 และมีปริมาณเนื้อลำไยอบแห้งขนาด 1/2 ลูก (ปริมาณ 2 ชิ้น) แสดงดัง Table 3 โดยการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ พบว่าผงชาลำไยผสมสมุนไพรมีค่า a_w เท่ากับ 0.40 ± 0.01 ค่า L* เท่ากับ 31.96 ± 0.25 ค่า a* เท่ากับ 10.48 ± 0.32 และค่า b* เท่ากับ 17.00 ± 0.10 จากการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมีพบว่าน้ำชาลำไยผสมสมุนไพรมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH radical scavenging activities และ ABTS radical cation decolorization จะได้ค่าเท่ากับ 6.21 ± 1.23 และ 8.43 ± 2.12 mmol Trolox/100 g DW ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP ได้ค่า 9.57 ± 2.07 mg $FeSO_4$/100 g DW นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกในน้ำชาลำไยผสมสมุนไพร พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.57 ± 0.17 g GAE/100 g DW ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในชาตะไคร้ ที่แช่ผงชาในน้ำร้อนอัตราส่วน 1 : 50 (w/v) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (0.644 ± 0.02 g GAE/100 g DW) (Chan *et al.*, 2010) ในขณะที่มีค่าปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกน้อยกว่าในชาใบหม่อนและชาตะไคร้ (1.16 ± 0.09 และ 1.37 ± 0.10g GAE/100 g DW ตามลำดับ) ที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างโดยการแช่ผงชาในน้ำร้อนอัตราส่วน 1 : 20 เป็นเวลา 10 นาที (Oh *et al.*, 2013) สำหรับคุณภาพทางจุลินทรีย์พบว่าน้ำชาลำไยผสมสมุนไพรมีค่าอยู่ในเกณฑ์ตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลิตภัณฑ์สมุนไพรรวมแห้งชงดื่ม (มผช. 996/2556) กำหนด

Table 3 Physical, chemical and microbiological qualities of Longan tea mixed with herbs and Longan pulp.

Qualities	Values
Physical qualities	
Water activity (a_w)	0.40 ± 0.01
color	
L*	31.96 ± 0.25
a*	10.48 ± 0.32
b*	17.00 ± 0.10
Chemical qualities	
Total phenolic content (g GAE/100 g DW)	0.57 ± 0.17
Antioxidant activity	
DPPH assay (mmol Trolox/100 g DW)	6.21 ± 1.23
ABTS assay (mmol Trolox/100g DW)	8.43 ± 2.12
FRAP assay (mg $FeSO_4$/100 g DW)	9.57 ± 2.07
Microbiological quality	
Total plate count (cfu/g)	< 1×10^4
Salmonella	-
Coliforms (MPN/g) (MPN/100 ml.)	< 2.2
E. coli	-
Yeast & mold (CFU/g)	< 100

4. การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่มที่พัฒนาได้

จากการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อน้ำชาลำไยผสมสมุนไพรที่พัฒนาได้ พบว่าคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏได้คะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 6.8 ด้านสีได้คะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 6.9 ด้านเนื้อสัมผัสได้คะแนนเฉลี่ย 5.9 ส่วนด้านกลิ่นรส รสชาติ และความชอบโดยรวมได้คะแนนเฉลี่ยเท่ากัน คือ 6.8 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง และจากการสอบถามด้านการยอมรับต่อน้ำชาลำไยผสมสมุนไพรพบว่าผู้บริโภคโดยส่วนใหญ่ให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ คิดเป็นร้อยละ 93 ดังแสดงใน Table 4

Table 4 Mean sensory liking scores of Longan tea mixed with herbs and Longan pulp.

Attributes	Mean ± S.D.
Appearance	6.8 ± 0.8
Color	6.9 ± 0.6
Texture	6.8 ± 1.2
Flavor	6.8 ± 0.7
Taste	7.1 ± 0.7
Overall liking	7.2 ± 0.7
Acceptability (%)	93
Unacceptability(%)	7

สรุป

จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่มพร้อมเนื้อลำไย พบว่ามีคุณประโยชน์เนื่องจากมีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในปริมาณเท่ากับ 0.57 g GAE/100 g DW และผลิตภัณฑ์มีค่าความหนืดเท่ากับ 50.75 เซนติพอยซ์ อยู่ในระดับที่มีความเหมาะสมสำหรับผู้มีภาวะการกลืนลำบากขั้นต้น ทำให้ลดความเสี่ยงที่จะเกิดการสำลักในผู้บริโภคกลุ่มผู้สูงอายุ นอกจากนั้นการเสริมเนื้อลำไยอบแห้งลงในเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรแบบชงดื่มมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณภาพทางด้านกลิ่นและรสชาติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวที่พัฒนาได้ยังได้รับคะแนนความชอบโดยรวมเมื่อทดสอบกับผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก (7.2) และได้รับการประเมินในด้านการยอมรับอยู่ในระดับที่สูง (ร้อยละ 93)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนการวิจัย ขอขอบคุณบริษัท สวนกนกอัณณ์ จำกัด ที่สนับสนุนวัตถุดิบ และขอขอบคุณภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงสาธารณสุข. 2547. **ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 280) พ.ศ. 2547 เรื่อง ชาสมุนไพร.** 4 มิถุนายน 2547.

ธัญดร ออกวะลา. 2553. **เอกสารประกอบการสอน วิชากลศาสตร์ของไหล** (Fluid Mechanics). ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

ปิยะภัทร เดชพระธรรม. 2556. ปัญหาการกลืนในผู้สูงอายุ (Dysphagia in Elderly). **J. Thai Rehabil. Med.** 23(3): 73-80.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2556. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสมุนไพรรวมแห้งชงดื่ม**. มผช. 996/2556.

ศศุภางค์ มุสิกบุญเลิศ. 2557. การรักษาผู้ป่วยกลืนลำบาก. **Srinagarind. Med. J.** 29: 16-19.

Chan, E.W.C., Y.Y. Lim, K.L. Chong, J.B.L. Tan and S.K. Wong. 2010. Antioxidant properties of tropical and temperate herbal teas. **J. Food Compos. Anal.** 23: 185–185.

National Dysphagia Diet Task Force. 2002. **National Dysphagia Diet: Standardization for Optimal Care**. Chicago, IL: American Dietetic Association

Rangkadilok, N., L. Worasuttayangkurn, R.N. Bennett and J. Satayavivad. 2005. Identification and Quantification of Polyphenolic Compounds in Longan (Euphoria longana Lam.) Fruit. **J. Agric. Food Chem** 53: 1387-1392.

Wall, M.W. 2006. Ascorbic acid and mineral composition of longan (Dimocarpus longan), lychee (Litchi chinensis) and rambutan (Nephelium lappaceum) cultivars grown in Hawaii. **Journal of Food Composition and Analysis** 19: 655–663.

ผลของสารฆ่าเชื้อที่ใช้ในการล้างต่อการยืดอายุการเก็บรักษามะพร้าวตัดแต่ง

Effects of Sanitizers on Shelf-life of Fresh-cut Coconut

มธุรญา สมจิตร์[2] วรรณี จิรภาคย์กุล[1,2*] และ ศศิธร ตรงจิตภักดี[1,2]

Mathuraya Somchit[1], Wannee Jirapakkul[1,2*] and Sasithorn Tongjitpakdee[1,2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารล้างต่อการยืดอายุการเก็บรักษามะพร้าวตัดแต่งพร้อมบริโภค(*Cocos nucifera* L.) โดยล้างมะพร้าวด้วยสาร 4 ชนิด ได้แก่ กรดซิตริก (C_6H_8O) (ร้อยละ 0.75, 1.5) เป็นเวลา 5 นาที, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) (ร้อยละ 0.5,1.5) เป็นเวลา 1 นาที, โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) (100, 150 ส่วนในล้านส่วน) เป็นเวลา 1 นาที, สารละลายโอโซน (O_3) (0.5, 1 ส่วนในล้านส่วน) เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้ชิ้นมะพร้าวที่ล้างด้วยน้ำประปาเป็นตัวอย่างควบคุม จากนั้นบรรจุตัวอย่าง 15 ชิ้นใส่ถาดพลาสติกโพลีโพรพิลีนและหุ้มด้วยฟิล์มยืดพีวีซี เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ±1 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และนำมาวิเคราะห์ทุก 2 วัน โดยมีการวิเคราะห์ดังนี้ สี ค่าพีเอช ปริมาณกรดทั้งหมด และคุณภาพทางจุลชีววิทยา จากการทดลองพบว่าสีของชิ้นมะพร้าวในแต่ละสารล้างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยวิเคราะห์จากค่าความขาว (whiteness) เปรียบเทียบชิ้นตัวอย่างในวันเดียวกัน กรดซิตริกมีผลต่อค่าพีเอชโดยที่ตัวอย่างที่ล้างด้วยกรดซิตริก (ร้อยละ 1.5) จะมีค่าพีเอชต่ำ (6.17) สอดคล้องกับปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ซึ่งสูงกว่าในตัวอย่างอื่น (2.97กรัม/ลิตร) นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างที่ล้างด้วยกรดซิตริกร้อยละ 0.75, 1.5) และH_2O_2 (ร้อยละ 0.5) มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดต่ำกว่า 10^6 CFU/g ตลอดการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตเห็นการเน่าเสียจากเชื้อจุลินทรีย์บนผิวของตัวอย่างในวันที่ 12 ซึ่งเกิดขึ้นช้ากว่าตัวอย่างอื่น จากผลการทดลองสรุปได้ว่า กรดซิตริก (ร้อยละ 1.5) สามารถยืดอายุการเก็บรักษามะพร้าวตัดแต่งได้นานที่สุด คือ 12 วัน โดยใช้การเกิดลักษณะการเน่าเสียที่ปรากฏและปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเป็นเกณฑ์

ABSTRACT

The effects of selected sanitizers on shelf life of fresh-cut coconut (*Cocos nucifera* L.) were investigated. Fresh-cut coconuts were dipped in citric acid (C_6H_8O) (0.75%, 1.5%) for 5 minutes, hydrogen peroxide (H_2O_2) (0.5%,1.5%) for 1 minute, sodium hypochlorite (NaOCl) (100 ppm, 150ppm) for 5 minutes, ozone (O_3) (0.5 ppm, 1ppm) for 5 minutes. The sample were packed in a plastic tray, wrapped with PVC film and stored at 4 ±1°C for 14 days. The sample treated with tap water was used as control. Color measurement, pH, titratable acidity and microbiological quality were evaluated every 2 days. For surface discoloration, there was a significant difference in whiteness between treatments in the same day ($p \leq 0.05$). pH value and titratable acidity were influenced by citric acid. The sample treated with 1.5% citric acid was low in pH value (6.17) while the titratable acidity was high (2.97 g/L). Moreover, number of aerobic plate count in citric acid (0.75%, 1.5%) and H_2O_2 (0.5%) treatments were below 10^6 CFU/g. Dipping with citric acid (1.5%) had shown the best result to prolong post-cutting life of coconut to 12 days, based on visual decay and loads of aerobic plate count.

Key words: fresh-cut, coconut meat, shelf life extension, sanitizers
* Corresponding author; e-mail address: Wannee.ch@ku.ac.th

---

[2]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กรุงเทพฯ 10400

[2]Postharvest Technology Innovation Center, Office of the Higher Education Commission, Bangkok 10400

คำนำ

มะพร้าว (*Cocos nucifera* L.) เป็นพืชที่มีการใช้ประโยชน์หลากหลาย มะพร้าวแก่ (10-13 เดือน) จะมีปริมาณน้ำน้อยกว่ามะพร้าวอ่อนและมีเนื้อขาวซึ่งสามารถรับประทานได้ทั้งแบบสดและแบบฝอยแห้ง รวมไปถึงนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารประเภทแกง ลูกอม ขนมหวาน (Debmandal and Mandal, 2011; Paull and Ketsa, 2015) ในเนื้อมะพร้าวแก่จะอุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหารสูง ให้ประโยชน์ทางคุณค่าทางโภชนาการที่ดีและจำเพาะแก่ผู้บริโภค (Solangi and Zafariqbal, 2011) ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ตัดแต่งได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั่วโลกมากขึ้น นอกจากคุณประโยชน์ด้านโภชนาการของผักและผลไม้แล้ว การตัดแต่งผลิตภัณฑ์ให้พร้อมรับประทานเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ผู้บริโภคนิยม เนื่องจากลดเวลาในการเตรียมเพิ่มความสะดวก แต่ยังคงความสดของผลิตภัณฑ์ จากคุณประโยชน์ของมะพร้าวการทำผลิตภัณฑ์มะพร้าวตัดแต่งเพื่อให้สะดวกต่อการรับประทานถือเป็นการสร้างโอกาสทางการตลาด (Albertini *et al.*, 2016) โดยเฉพาะในประเทศไทย อย่างไรก็ตามผักและผลไม้ที่ผ่านการตัดแต่งจะเน่าเสียอย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากกระบวนการแปรรูป เช่น การปอก การตัด การหั่นเต๋า แม้จะเป็นกระบวนการสั้นๆ ก็สามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์ได้ (Rico *et al.*, 2007. Ma *et al.*, 2017) การปอกเปลือกและขั้นตอนการเตรียมจะทำให้มะพร้าวเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดการเหม็นหืนและปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการเน่าเสียอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับผลไม้ชนิดอื่นที่ผ่านการปอกเมื่อเทียบกับผลไม้ทั้งลูก (Ferrentino *et al.*, 2012) ดังนั้นจึงต้องมีการการยืดอายุผลิตภัณฑ์ตัดแต่ง

การใช้สารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ถือเป็นหนึ่งในวิธีการยืดอายุผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการใช้สารเคมีในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ได้ (Albertini *et al.*, 2016) กรดอินทรีย์จำพวกกรดซิตริกเป็นหนึ่งในสารที่ได้รับความนิยมเพื่อใช้ในการยืดอายุผลิตภัณฑ์ตัดแต่ง เพราะทำให้อาหารมีค่าพีเอชลดลงไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Rico *et al.*, 2007) ซึ่งโดยทั่วไปในผลไม้มักมีกรดเป็นส่วนประกอบ ทำให้มีความปลอดภัยเมื่อใช้ในอาหารโดยจัดอยู่ในกลุ่ม GRAS (Generally Recognized as Safe) สำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง ถูกใช้อย่างแพร่หลายเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ (Peng *et al.*, 2008) สามารถนำมาใช้ได้ในอาหารอย่างปลอดภัย (GRAS) ถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ตัดแต่งเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ (Sharaf-Eldin and Geosel, 2016) เช่นเดียวกับสารประกอบคลอรีนที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอาหารสดเพื่อลดจำนวนจุลินทรีย์ โดยเฉพาะในรูปของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO) (Joshi *et al.*, 2013) เพื่อความปลอดภัยเมื่อใช้ในอาหารคลอรีนอิสระต้องมีความเข้มข้นระหว่าง 50 ถึง 300 ส่วนในล้านส่วน มีระยะเวลาสัมผัสอาหารไม่เกิน 5 นาที และสารละลายควรมีค่าพีเอชในช่วง 6 ถึง 7 (Rico *et al.*, 2007) โอโซนเป็นหนึ่งในสารต้านจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง ไม่ทิ้งสารตกค้างเพราะสลายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร จัดอยู่ในกลุ่ม GRAS เช่นเดียวกัน ซึ่งโอโซนสามารถใช้ได้ทั้งในรูปแก๊สและสารละลาย นอกจากลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ โอโซนยังสามารถสลายแก๊สเอทิลีนในผลิตตัดแต่งได้อีกด้วย (Rico *et al.*, 2007; Joshi *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2017. Ma *et al.*, 2017)

งานวิจัยเกี่ยวกับสารฆ่าเชื้อในการล้างมะพร้าวตัดแต่งมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของกรดซิตริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ และสารละลายโอโซน ต่อคุณภาพของมะพร้าวตัดแต่งเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

ปอกมะพร้าว (*Cocos nucifera* L.) จนเหลือแต่เนื้อขาว ล้างด้วยน้ำประปาจากนั้นจึงนำไปตัดแต่งให้ได้ขนาด 1 นิ้ว ×1 นิ้ว และเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนจากอุปกรณ์ที่ใช้ในระหว่างกระบวนตัดแต่ง เช่น มีด เขียง ถาด ที่คีบ จะถูกนำไปล้างด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 1000 ppm (ปรับกรดด้วยกรดซิติก จนมีค่าพีเอช 6.5) นาน 30 นาที ซึ่งตัวอย่างที่ได้จะถูกแบ่งเป็นกลุ่ม ล้างด้วยสารฆ่าเชื้อ 4 ชนิด ที่ความเข้มข้น 2 ระดับ ดังนี้ (1) กรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 0.75 และ 1.5 เป็นเวลา 5 นาที, (2) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และ 1 เป็นเวลา 1 นาที, (3) โซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้น 100 และ 150 ส่วนในล้านส่วน เป็นเวลา 5 นาที, (4) สารละลายโอโซนความเข้มข้น 0.5 และ1 ส่วนในล้านส่วน เป็นเวลา 5 นาที และ ชุดควบคุม ล้างเฉพาะน้ำประปา หลังจากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำดื่ม ซับน้ำออกให้แห้งด้วยผ้าขาวบางที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ บรรจุตัวอย่าง 15 ชิ้น ลงในถาดพลาสติกโพลีโพรพิลีน (S&C) ขนาด 20 เซนติเมตร×13เซนติเมตร×4 เซนติเมตร และปิดด้วยฟิล์มยืดพีวีซี (หนา 0.011 มิลลิเมตร, MMP corporation Ltd., ประเทศไทย) น้ำหนักรวม 150 ±15 กรัม เก็บที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส ตรวจวิเคราะห์และสังเกตตัวอย่างทุก 2 วัน นาน 14 วัน

การวิเคราะห์คุณภาพของมะพร้าวตัดแต่ง

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงด้านสี โดยใช้เครื่อง UltraScan PRO Spectrophotometer (HunterLab, Hunter Associates Laboratory Inc., สหรัฐอเมริกา) วัดตัวอย่างชิ้นมะพร้าวด้านนอก ค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปแบบ L* (lightness) , a* (redness) and b* (yellowness) ในงานวิจัยนี้จะแสดงการเปลี่ยนสีในรูปของค่าความขาว (WI) สามารถคำนวณได้จากสมการ WI= L* - 3b* สมการที่ 1 (Chen *et al*., 2016)

การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช โดยใช้วิธีดัดแปลงจาก Ferrentino *et al.* (2013) เริ่มต้นจากนำตัวอย่างประมาณ 30 กรัม ปั่นผสมกับน้ำกลั่น 30 กรัม คั้นน้ำมะพร้าวโดยใช้ผ้าขาวบาง จากนั้นแบ่งน้ำที่คั้นได้ประมาณ 10 มิลลิลิตร ตรวจวัดค่าพีเอช ด้วยเครื่องวัดค่าพีเอช (Mettler Toledo, สหรัฐอเมริกา)

ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ โดยใช้วิธีดัดแปลงจาก Ferrentino *et al.* (2013) โดยการไทเทรตตัวอย่างน้ำมะพร้าวคั้นที่ได้ จำนวน 10 มิลลิลิตร เติมฟีนอล์ฟทาลีน 2 หยด นำไปไทเทรตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05N จนตัวอย่างถึงจุดยุติที่สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนและคำนวณหาปริมาณกรดในรูปกรดลอลิก (Lauric acid) เนื่องจากเป็นกรดมีปริมาณมากที่สุดในมะพร้าวจากสมการ

$$\text{TA (Lauric acid g/L)} = \frac{\text{NaOH used (mL)} \times \text{Normality of NaOH} \times \text{Molecular weight of lauric acid}}{\text{Volume of homogenized sample (mL)}} \quad \text{สมการที่ 2}$$

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และรา ตรวจวัดปริมาณจุลินทรีย์ โดยการสุ่มตัวอย่างชิ้นมะพร้าวด้วยวิธีการปลอดเชื้อ(aseptic technique) หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ นำตัวอย่าง 10 กรัม ตีปั่นกับ 0.1% เปปโตน (Merck, เยอรมนี) 90 มิลลิลิตร ด้วยความเร็ว 230 รอบต่อวินาที นาน 2 นาที ด้วยเครื่องตีปั่น (Seward, อังกฤษ) ตัวอย่างเจือจางที่ได้จะมีความเข้มข้นที่ $1{:}10^{-1}$ จากนั้นทำการเจือจางให้ได้ระดับที่ต้องการและตรวจวัดปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อยีสต์และรา ดังนี้

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยใช้วิธี Standard Method Agar (SMA) ดัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000) นำตัวอย่างที่อยู่ในระดับความเจือจางที่ต้องการ 1 มิลลิลิตร เพาะในอาหาร Plate count agar (PCA) (Merck, เยอรมนี) โดยใช้เทคนิค pour plate นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นับจำนวนแบคทีเรีย (colony forming unit, CFU/กรัม) เมื่อสิ้นสุดเวลาบ่ม

ปริมาณยีสต์และรา โดยใช้วิธี Standard Method Agar (SMA) ดัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000) นำตัวอย่างที่อยู่ในระดับความเจือจางที่ต้องการ 0.1 มิลลิลิตร หยดบนอาหารแข็ง Potato dextrose agar (PDA) (Merck, เยอรมนี) ที่ปรับ pH ประมาณ 3.5 จากนั้นกระจายตัวอย่างให้ทั่วผิวหน้าอาหารโดยใช้เทคนิค spread plate นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 96 ชั่วโมง นับจำนวนยีสต์และราเมื่อสิ้นสุดเวลาบ่ม

การวิเคราะห์ข้อมูล

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD (ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน(Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Science for Windows)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของมะพร้าวตัดแต่ง

เปลี่ยนจากสีขาวไปเป็นสีเหลือง (Signigaglia *et al.,* 2003) จากการวิเคราะห์ค่าความขาว (whiteness) ของตัวอย่างพบว่า ค่าความขาวของตัวอย่างควบคุมลดลงอย่างมีนัยสำคัญในวันที่ 10 เมื่อเทียบวันแรกของการเก็บรักษา ($p \leq 0.05$) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกรดซิตริกมีผลต่อความขาวของมะพร้าว ทำให้มะพร้าวมีความขาวมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) หลังจากล้างในวันแรก เป็นผลจากคุณสมบัติการฟอกสีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สอดคล้องกับ Sharaf-Eldin and Geösel (2016) ศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเห็ดกระดุมสีขาวพบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเพิ่มความขาวและลดการเกิดสีน้ำตาลในเห็ดได้ ในขณะที่กรดซิตริกมีส่วนช่วยในการลดการเกิดสีน้ำตาลเช่นเดียวกัน ส่วนโอโซนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างตั้งแต่วันแรกของการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (Table 1)

Table 1 Effect of C_6H_8O (0.75%, 1.5%), H_2O_2 (0.5%, 1.5%), NaOCl (100 ppm, 150ppm), ozone (0.5 ppm, 1ppm) on whiteness of fresh-cut coconut stored at 4 ± 1°C for 14 days.

	Storage Time (day)							
	D0	D2	D4	D6	D8	D10	D12	D14
Control	$64.35±2.84^{bBC}$	$66.29±2.25^{dC}$	$65.19±3.89^{bC}$	$64.9±5.65^{abcC}$	$61.84±6.47^{abAB}$	$60.78±5.28^{dA}$	$61.73±4.97^{abAB}$	$61.88±7.20^{aAB}$
0.75%C_6H_8O	$67.57±4.07^{cDE}$	$63.70±2.07^{bcB}$	$69.22±2.71^{cE}$	$67.03±4.90^{deD}$	$65.11±3.34^{cdBC}$	$66.00±1.96^{eCD}$	$61.79±4.01^{abA}$	$63.77±1.93^{bcB}$
1.5%C_6H_8O	$64.03±5.75^{abAB}$	$62.78±1.75^{bcA}$	$70.94±4.11^{cE}$	$68.82±3.62^{eD}$	$66.41±4.24^{dC}$	$65.03±2.57^{deBC}$	$65.84±3.29^{bcdBC}$	$62.32±4.18^{aA}$
0.5%H_2O_2	$68.04±2.08^{cC}$	$64.47±2.98^{cdAB}$	$64.27±3.68^{bA}$	$66.03±2.13^{cdB}$	$66.04±3.46^{dB}$	$62.76±3.61^{bcA}$	$64.16±3.18^{cdA}$	$63.39±2.93^{bcA}$
1%H_2O_2	$67.55±2.40^{cC}$	$63.22±4.24^{bcAB}$	$61.94±4.01^{bA}$	$62.91±3.88^{abAB}$	$64.16±3.83^{bdbAB}$	$64.45±3.08^{cdeB}$	$64.06±5.39^{dAB}$	$64.71±3.40^{cB}$
100ppmNaOCl	$63.41±3.41^{abAB}$	$63.70±4.00^{bdB}$	$64.63±3.64^{bBC}$	$66.39±2.64^{dC}$	$62.92±3.31^{abcAB}$	$63.09±3.16^{bcdAB}$	$61.32±5.01^{aA}$	$63.12±3.73^{bcAB}$
150ppmNaOCl	$61.88±2.97^{aA}$	$60.42±4.64^{aA}$	$65.34±3.64^{bB}$	$66.01±3.89^{cdB}$	$61.01±5.46^{dA}$	$62.34±2.20^{bA}$	$61.24±3.84^{dA}$	$61.58±3.14^{aA}$
0.5ppmO_3	$62.76±5.22^{abBC}$	$59.97±4.68^{dA}$	$64.99±4.29^{bCD}$	$63.89±3.67^{bcBCD}$	$62.21±4.28^{abB}$	$64.24±3.87^{bcdeBCD}$	$65.37±2.68^{dD}$	$62.64±3.22^{bcB}$
1.0ppmO_3	$62.66±5.23^{abAB}$	$61.72±3.70^{abA}$	$63.60±3.71^{abAB}$	$61.40±4.48^{aA}$	$62.60±5.15^{abcAB}$	$64.41±2.72^{cdeB}$	$62.91±4.30^{abcAB}$	$63.11±4.16^{bcAB}$

Means within column followed by different letter are significantly different by using Duncan's new multiple range test at 95%
Value expressed are mean ±. Standard deviation
Different superscript small letters in the same column are significantly different at $p \leq 0.05$
Different superscript capital letters in the same row are significantly different at $p \leq 0.05$

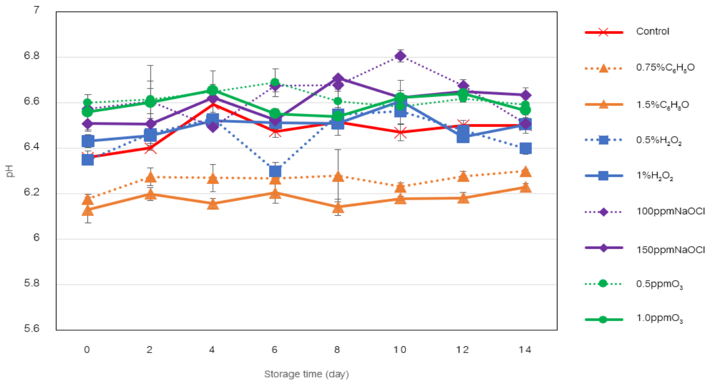


Figure 1 Effect of C_6H_8O (0.75%, 1.5%), H_2O_2 (0.5%,1.5%), NaOCl (100 ppm, 150ppm), ozone (0.5 ppm, 1ppm) on pH of fresh-cut coconut stored at 4 ± 1°C for 14 days.

ค่าพีเอชของทุกตัวอย่างอยู่ในช่วง 6.1-6.8 ตลอดการเก็บรักษาซึ่งใกล้เคียงกับค่าปกติของเนื้อมะพร้าวที่มีค่าประมาณ 6 (Ferrentino *et al.*, 2012) (Figure 1) อย่างไรก็ตามมะพร้าวที่ล้างด้วยสารละลายกรดซิตริกมีค่าพีเอชต่ำกว่าตัวอย่างอื่นเฉลี่ยอยู่ที่ 6.17 ตลอดการทดลอง ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของมะพร้าวคือ 1.5-2.5 กรัม/ลิตร ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยแม้จะเก็บรักษานานขึ้น ตัวอย่างที่ล้างด้วยสารละลายกรดซิตริกร้อยละ 1 มีปริมาณกรดที่ไทเทรตได้สูงกว่าตัวอย่างอื่น (2.97 กรัม/ลิตร) อย่างมีนัยสำคัญ $(p \le 0.05)$ ค่าพีเอชสอดคล้องกับปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ในตัวอย่างที่ล้างด้วยสารละลายกรดซิตริก ซึ่งเป็นผลมาจากขั้นตอนการล้าง ในขณะที่ตัวอย่างที่ล้างด้วยสารละลายโอโซนทั้ง 2 ความเข้มข้น มีปริมาณกรดที่ไทเทรตได้น้อยกว่าสารละลายอื่นอย่างมีอย่างมีนัยสำคัญ $(p \le 0.05)$ เมื่อเปรียบเทียบกับสารล้างอื่นในวันเดียวกัน อย่างไรก็ตาม กรดมีส่วนสำคัญในการชี้วัดอายุของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกรดอินทรีย์จะถูกใช้ในกระบวนการหายใจเพื่อให้เซลล์ยังมีชีวิตอยู่ เมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ปริมาณกรดลดลงและค่าพีเอชเพิ่มขึ้น แต่มะพร้าวมีอัตราการหายใจต่ำมาก (Paull and Ketsa, 2015) ทำให้ปริมาณกรดในตัวอย่างมะพร้าวไม่แสดงการลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออยู่ในช่วงท้ายของการเก็บรักษา ในทางกลับกันตัวอย่างมีค่าพีเอชลดลงและปริมาณกรดเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย (Ferrentino and Spilimbergo, 2015) การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของค่าพีเอชและปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ในมะพร้าวเป็นการแสดงให้เห็นว่าคุณภาพด้านนี้อาจจะไม่ใช่คุณภาพสำคัญในการกำหนดอายุการเก็บรักษาของมะพร้าวตัดแต่ง

Table 2 Effect of C_6H_8O (0.75%, 1.5%), H_2O_2 (0.5%,1.5%), NaOCl (100 ppm, 150ppm), ozone (0.5 ppm, 1ppm) on Titratable acidity of fresh-cut coconut stored at 4 ± 1°C for 14 days.

	Storage Time (day)							
	D0	D2	D4	D6	D8	D10	D12	D14
Control	1.98 ± 0.05^{bc}	2.05 ± 0.06^{b}	2.05 ± 0.06^{b}	2.08 ± 0.10^{d}	1.90 ± 0.14^{b}	2.13 ± 0.10^{ab}	2.03 ± 0.17^{a}	2.05 ± 0.06^{a}
0.75%C_6H_8O	2.08 ± 0.17^{c}	2.38 ± 0.10^{d}	3.38 ± 0.13^{e}	2.45 ± 0.37^{c}	2.10 ± 0.18^{bc}	2.20 ± 0.08^{b}	2.28 ± 0.25^{b}	2.35 ± 0.06^{b}
1.5%C_6H_8O	2.75 ± 0.13^{e}	2.95 ± 0.13^{e}	3.45 ± 0.18^{e}	3.05 ± 0.24^{e}	2.80 ± 0.08^{d}	2.93 ± 0.17^{e}	2.95 ± 0.13^{e}	3.10 ± 0.08^{a}
0.5%H_2O_2	2.30 ± 0.16^{d}	2.35 ± 0.13^{cd}	2.20 ± 0.26^{bcd}	2.63 ± 0.10^{cd}	2.30 ± 0.16^{cd}	2.58 ± 0.44^{bc}	1.48 ± 0.17^{bc}	2.78 ± 0.17^{c}
1%H_2O_2	2.45 ± 0.13^{d}	2.13 ± 0.13^{b}	2.40 ± 0.08^{d}	2.53 ± 0.10^{cd}	2.45 ± 0.13^{d}	2.58 ± 0.05^{c}	2.53 ± 0.10^{c}	2.90 ± 0.14^{c}
100ppmNaOCl	2.28 ± 0.10^{d}	2.05 ± 0.06^{b}	2.13 ± 0.10^{bc}	2.03 ± 0.05^{b}	2.23 ± 0.10^{cd}	2.10 ± 0.08^{a}	1.98 ± 0.05^{a}	2.28 ± 0.10^{b}
150ppmNaOCl	2.43 ± 0.10^{d}	2.18 ± 0.13^{bc}	$2.28\pm0.1d^{cd}$	2.10 ± 0.08^{b}	2.10 ± 0.12^{bc}	1.90 ± 0.08^{a}	2.03 ± 0.05^{a}	2.28 ± 0.10^{b}
0.5ppmO_3	1.75 ± 0.06^{a}	1.78 ± 0.05^{a}	1.75 ± 0.06^{a}	1.70 ± 0.08^{a}	1.53 ± 0.10^{a}	1.88 ± 0.15^{a}	1.98 ± 0.17^{a}	2.05 ± 0.10^{a}
1.0ppmO_3	1.83 ± 0.13^{ab}	1.75 ± 0.24^{a}	1.75 ± 0.10^{a}	2.13 ± 0.10^{b}	1.93 ± 0.13^{b}	1.90 ± 0.12^{a}	2.03 ± 0.17^{a}	1.95 ± 0.13^{a}

Means within column followed by different letter are significantly different by using Duncan's new multiple range test at 95%

Value expressed are mean ±. Standard deviation

Different superscript small letters in the same column are significantly different at $p < 0.05$

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และราของตัวอย่างทั้งที่ผ่านการล้างด้วยสารละลายทั้ง 4 ชนิด คือ กรดซิตริก(ร้อยละ 0.75, 1.5), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ร้อยละ 0.5,1.5), โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (100, 150 ส่วนในล้านส่วน), สารละลายโอโซน (0.5, 1 ส่วนในล้านส่วน) และตัวอย่างควบคุมเพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา แต่ในตัวอย่างควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นมากกว่า 10^6 CFU/กรัม ตั้งแต่วันที่ 4 ของการเก็บรักษา ซึ่งเกินกำหนดของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กรดซิตริกร้อยละ 1.5 และสารละลายโอโซน 1 ส่วนในล้านส่วนสามารถลดปริมาณปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเริ่มต้นได้มากที่สุด 2 log CFU/กรัม เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (Figure 2) ปริมาณเชื้อที่ลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่ใช้สารละลายโอโซนในผักและผลไม้สดตัดแต่ง (Joshi *et al.*, 2013) ตัวอย่างที่ล้างด้วยกรดซิตริก (ร้อยละ 0.75, 1.5) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ร้อยละ 0.5) มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกินเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด คือ 10^6 CFU/กรัม ตลอดการทดลอง เนื่องจากมีสภาวะเป็นกรดสูงเป็นผลมาจากขั้นตอนการล้างด้วยกรดและความสามารถในการออกซิไดซ์ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลของกรดซิตริกต่อแบคทีเรียในมะพร้าวสอดคล้องกับผลวิจัยของ Akbas and Ölmez (2007) พบว่ากรดซิตริกร้อยละ 0.1 สามารถลดปริมาณเชื้อ *E. coli* ได้ 2 log CFU/กรัม ในผักกาดหอม ในขณะที่ปริมาณยีสต์และรา (Figure 3) ของตัวอย่างที่ล้างด้วยสารละลายโอโซนสูงกว่าในตัวอย่างอื่น ซึ่งตามข้อกำหนดปริมาณของยีสต์และราต้องไม่เกิน 1000 และ 500 CFU/กรัม ตามลำดับ จากการสังเกตโคโลนีที่นับได้ส่วนใหญ่เป็นโคโลนีของยีสต์ และมีเพียงตัวอย่างที่ล้างด้วยสารละลายโอโซนความเข้มข้น 0.5 ส่วนในล้านส่วนเกินกำหนดมาตรฐานความปลอดภัย ในวันที่ 12 ของการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามแม้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด รวมไปถึงปริมาณยีสต์และราจะยังไม่เกินกำหนดมาตรฐานแต่สามารถสังเกตเห็นการเน่าเสียจากจุลินทรีย์บนผิวของตัวอย่างโดยจะสังเกตเห็นจุดสีเหลืองรวมไปถึงเมือกใส ในวันที่ 8 ของการเก็บรักษาของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่ล้างด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 100 ส่วนในล้านส่วน ในขณะที่ตัวอย่างอื่นพบในวันที่ 10 ยกเว้นตัวอย่างที่ล้างด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 พบในวันที่ 12 ของการทดลอง อายุการเก็บรักษาของตัวอย่างควบคุมสั้นกว่าการศึกษาของ Signigaglia *et al.* (2003) ที่ทำนายอายุการเก็บรักษาของมะพร้าวตัดแต่งพร้อมรับประทานไว้ 6 วัน โดยพิจารณาอ้างอิงจากปริมาณเชื้อแบคทีเรียและลักษณะปรากฏที่แสดงให้เห็นการเน่าเสีย

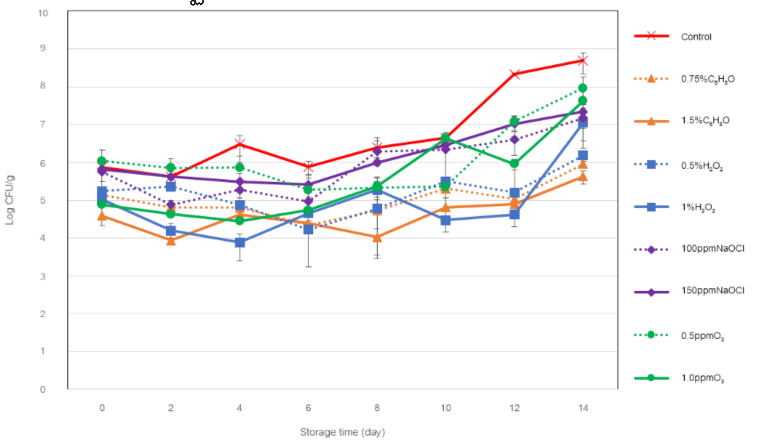


Figure 2 Effect of C_6H_8O (0.75%, 1.5%), H_2O_2 (0.5%,1.5%), NaOCl (100 ppm, 150ppm), ozone (0.5 ppm, 1ppm) on number of aerobic plate count of fresh-cut coconut stored at 4 ± 1°C for 14 days.

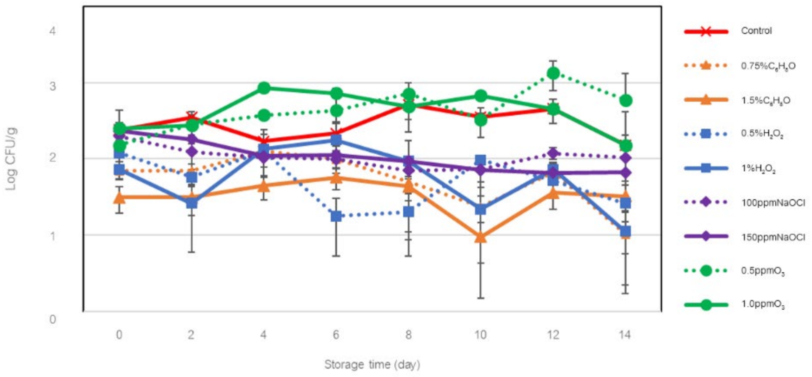


Figure 3 Effect of C_6H_8O (0.75%, 1.5%), H_2O_2 (0.5%,1.5%), NaOCl (100 ppm, 150ppm), ozone (0.5 ppm, 1 ppm) on yeast and mold loads of fresh-cut coconut stored at 4 ± 1°C for 14 days.

สรุปผล

การศึกษาผลการยืดอายุชิ้นมะพร้าวด้วยการล้างด้วยสารเคมี 4 ชนิด 2 ระดับความเข้มข้น ประกอบด้วย กรดซิตริก (ร้อยละ 0.75 ,1.5), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ร้อยละ 0.5,1.5), โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (100, 150 ส่วนในล้านส่วน), สารละลายโอโซน (0.5, 1 ส่วนในล้านส่วน) เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ล้างด้วยน้ำประปา พบว่าตัวอย่างที่ล้างด้วยกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ1.5 มีอายุการเก็บรักษานานที่สุดคือ 12 วัน โดยพิจารณาจากลักษณะการเน่าเสียที่ปรากฏและปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ในขณะที่คุณภาพด้านอื่นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กรุงเทพฯ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. 2560. **เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่** .3โรงพิมพ์บริษัทพีทูดีไซน์แอนด์พริ้นท์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

Akbas, M.Y. and H. Ölmez. 2007. Inactivation of *Escherichia* coli and *Listeria monocytogenes* on iceberg lettuce by dip wash treatments with organic acids: **The Society for Applied Microbiology, Letters in Applied Microbiology** 44: 619–624.

Albertini, S., A.E.L. Reyes, J.M. Trigo, A.S. Sarriés and M.H.F. Spoto. 2016. Effects of chemical treatments on fresh-cut papaya. **Food Chemistry** 190: 1182-1189.

AOAC. 2000**. Official Method of Analysis of AOAC international**. 17th ed. Arlington, Va: Association of Official Analytical Chemists. Inc.

Chen, C., W. Hu, Y. He, A. Jiang and R. Zhang. 2016. Effect of citric acid combined with UV-C on the quality of fresh-cut apples. **Postharvest Biology and Technology** 111: 126-131.

Debmandal, M. and S. Mandal. 2011. Coconut *(Cocos nucifera* L.: Arecaceae): In health promotion and disease prevention: Asian Pacific. **Journal of Tropical Medicine** 4: 241-247.

Ferrentino, G., S. Balzan, A. Dorigato, A. Pegoretti and S. Spilimbergo. 2012. Effect of supercritical carbon dioxide pasteurization on natural microbiota, texture, and microstructure of fresh-cut coconut. **Journal of Food Science** 77: 1-5.

________, A. Belscak-Cvitanovic, D. Komes and S. Spilimbergo. 2013. Quality attributes of fresh-cut coconut after supercritical carbon dioxide pasteurization. **Journal of Chemistry** doi.org/10.1155/2013/703057.

________ and S. Spilimbergo. 2015. High power ultrasound assisted high pressure carbon dioxide pasteurization of fresh cut coconut. **Chemical Engineering Transactions** 44.

Han, Q., H. Gao, H. Chen, X. Fang and W. Wu. 2017. Precooling and ozone treatments affect postharvest quality of black mulberry (*Morus nigra*) fruits. **Food Chemistry** 221: 1947-1953.

Joshi, K., R. Mahendran, K. Alagusundaram, T.Norton and B.K. Tiwari. 2013. Novel disinfectants for fresh produce. **Trends in Food Science & Technology** 34: 54-61.

Ma, L., M. Zhang, B. Bhandari and Z. Gao. 2017. Recent developments in novel shelf life extension technologies of fresh-cut fruits and vegetables. **Trends in Food Science & Technology** 64: 23-38.

Paull, R.E. and S. Ketsa. 2015. Coconut: postharvest of quality-maintenance guidelines. **Fruit, Nut, and Beverage Crops**.

Peng L., Z. Yang, Q. Li, Y. Jiang and D.C. Joyce. 2008. Hydrogen peroxide treatments inhibit the browning of fresh-cut Chinese water chestnut. **Postharvest Biology and Technology** 47: 260-266.

Rico, D., A.B. Martı´n-Dianaa, J.M. Baratb and C. Barry-Ryan. 2007. Extending and measuring the quality of fresh-cut fruit and vegetables: a review. **Trends in Food Science & Technology** 18: 373-386.

Sharaf-Eldin, M.A. and A. Geosel. 2016. Efficacy of hydrogen peroxide on postharvest quality of white button mushroom: Egyptian. **Journal of Horticulture** 42: 1-17.

Sinigiglia, M., M.R. Corbo, D. D'Amato, D. Campaniello and C. Altieri. 2003. Shelf-life modelling of ready-to-eat coconut**. International Journal of food Science and Technology** 38: 547-552.

Solangi, H.M. and M. Zafariqbal. 2011. Chemical composition of meat (kernel) and nut water of major coconut (Cocos nucifera L.) cultivars at coastal area of Pakistan. **Journal of Botany** 43(1): 357-363.

Inclusivity and Exclusivity of Multiplex PCR for Specific Detection of Shiga toxin-producing *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes*

Chanokchon Jaroenporn[1], Damkerng Bundidamorn[1,2], Pathima Udompijitkul[1,2],
Anunchai Assawamakin[3] and Sudsai Trevanich[1,2*]

ABSTRACT

Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC), *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* are major foodborne pathogenic bacteria that have become a widely significant public health concern in many countries around the world. The objective of this study is to verify the specific primer under optimized multiplex PCR for detection of those three target bacteria in food. The inclusivity of mPCR was performed on 159 strains of target bacteria including 19 strains of STEC, 93 strains of *Salmonella* spp., 47 strains of *L. monocytogenes* while the exclusivity was done with 30 strains of non-target bacteria. Five pairs of primers for a specific target gene of each target bacterium were selected and tested under the optimized mPCR assay. DNA products of 210, 110, 482, 284, 348 and 65 bp were amplified from stx1, stx2, eae, invA, hlyA and IAC primers which were specific to STEC, *Salmonella* spp., *L. monocytogenes* and pUC19, respectively. Both inclusivity and exclusivity of all tested primers under the developed mPCR assay were 100%.

Key words: Multiplex PCR, Foodborne pathogen, Shiga toxin-producing *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*

* Corresponding author; e-mail address: fagisstn@ku.ac.th

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Center for Advanced Studies for Agriculture and Food, Kasetsart University Institute for Advanced Studies, Kasetsart University, Bangkok 10900

[3]Department of Pharmacology, Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok 10400

INTRODUCTION

Shiga-toxin producing *Escherichia coli* (STEC), *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* are significant foodborne pathogenic bacteria which cause food poisoning in many countries around the world and frequently reported as the main three causative agents in a wide range of foods (Centers of Disease Control and Prevention, 2019). STEC are responsible for bloody diarrhea and hemolytic uremic syndrome in consumers. STEC have been contaminated in various foods, such as raw or uncooked ground meat product and raw milk as well as during food preparation (World Health Organization [WHO], 2018a). *Salmonella* spp. were frequently associated with mortality outbreaks in food of animal origin such as eggs, meat, milk and poultry (WHO, 2018c). *L. monocytogenes* have been recognized as Listeriosis-causing pathogenic bacteria and can contaminate almost all kind of food such as deli meat, ready-to-eat meat products, soft cheeses and cold smoked fishery products as well as during processing (WHO, 2018b).

As standard methods for detection of foodborne pathogenic bacteria are generally expensive, complicated and time-consuming, so many alternative methods including conventional polymerase chain reaction (PCR), multiplex PCR and real time PCR, have been increasing a great attention (Xu *et al*., 2016). However, the developed alternative methods in the microbiological analysis of foods need to be validated for sensitivity, relative level of detection and inclusivity and exclusivity regarding to ISO 16140:2016 compared the standard method before implementation (ISO 16140:2016). Recently, Supawasit *et al.* (2018) studied and developed the optimized conditions of mPCR assay for simultaneously specific and sensitive detection of STEC, *Salmonella* spp. and *L. monocytogenes* by using primer sets specified to target genes of those three pathogenic bacteria. Therefore, in this study inclusivity and exclusivity of the developed mPCR assay for specific detection of STEC, *Salmonella* spp. and *L. monocytogenes* were done according to ISO 16140:2016.

MATERIALS AND METHODS

1. Bacterial strains

A total of 189 bacteria strains were used to determine inclusivity and exclusivity of the optimized mPCR assay. Inclusivity was performed on 159 target pathogenic bacteria including 19 strains of STEC, 93 strains of *Salmonella* spp. and 47 strains of *L. monocytogenes*. Exclusivity was done with 30 non-target bacteria, e.g. *Aeromonas hydrophila* DMST 21250, non-pathogenic *E. coli*, *Pediococcus pentosaceus* DMST 18752, *Vibrio parahaemolyticus* DMST 21243, *Listeria innocua* DMST 9011, *L. ivanovii* DMST 9012, *V. vulnificus* DMST 21245, *Yersinia enterocolitica* DMST 16385 and *Streptococcus pyogenes*. All bacterial strains were maintained as frozen stock culture in cryo-beads (Cryoinstant®, Scharlau, Barcelona, Spain) at -20 °C in a freezer. A working stock was prepared by activating the frozen stock culture in Tryptic soy broth (TSB) at appropriate incubation for each bacterial strains (Supawasit *et al*., 2018). All bacteria used in this experiment were purchased from Centers of Disease Control and Prevention (CDC, Atlanta, USA), Department of Medical Sciences (DMST, Bangkok, Thailand) and Department of Microbiology, Faculty of Science, Songkla University.

2. Primer pairs

A total of 5 specific primer pairs and target genes were used for inclusivity and exclusivity tests under the optimized mPCR assay. Internal amplification control (IAC) primer specific to *ori* pUC19 was included as control of false negative result of mPCR reaction. The information of primer pairs, target

genes and target strains are shown in Table1. The specificity of purified DNA of each target bacterium was tested under the optimized mPCR assay developed by Supawasit *et al.* (2018).

Table 1 Primer pairs and target genes used for inclusivity and exclusivity.

Primer	Primer sequence (5'-3')	Target gene	Target	Product size (bp)	Reference
stx1-F stx1-R	TGTAACTGGAAAGGTGGAGTATACA GCTATTCTGAGTCAACGAAAAATAAC	*stx1*	STEC	210	Meng *et al.* (1997)
stx2-F stx2-R	ATCAGTCGTCACTCACTGGT CTGCTGTCACAGTGACAAA	*stx2*	STEC	110	Pal *et al.* (1999)
eae-F eae-R	TCAATGCAGTTCCGTTATCAGTT GTAAAGTCCGTTACCCCAACCTG	*eae*	STEC	482	Vidal *et al.* (2005)
invA-F invA-R	GTGAAATTATCGCCACGTTCGGGCAA TCATCGCACCGTCAAAGGAACC	*invA*	*Salmonella* spp.	284	Rahn *et al.* (1992)
hlyA-F hlyA-R	AAATCATCGACGGCAACCT GGACGATGTGAAATGAGC	*hlyA*	*L. monocytogenes*	348	Lui *et al.* (2012)
IAC-F IAC-R	CAGGATTGACAGAGCGAGGTATG CGTAGTTAGGCCACCACTTCAAG	*ori*	pUC19	65	Li and Chen (2012)

**stx1* and *stx2* gene; Shiga toxin gene, *eae* gene; Intimin gene, *invA* gene; Invasion gene and *hlyA* gene; Hemolysin A gene

3. Test culture preparation

One loopful of each pure bacterial strain from working stock (Tryticase soy agar slant) was transferred into 10 ml of TSB and incubated at 37°C for 24 h. After that, ten microliter of culture sample was consecutively reactivated twice into 10 ml of TSB and incubated at 37°C for 18 h and 24 h in order to achieve a final concentration of 10^8-10^9 CFU/ml. The culture suspension was then serially ten-folded dilution with modified simultaneous enrichment broth (mSEB) (Supawasit *et al.* 2018). One milliliter of the culture at appropriate dilution was added into 24 ml of 0.1% peptone water, transferred to 225 ml mSEB, and incubated at 37°C for 24 h. One milliliter of the culture was taken for DNA extraction. When the developed method gave negative or doubtful results, the test should be repeated and with the reference method according to Bacteriological Analytical Manual included.

4. DNA extraction

DNA extraction was performed by using 1 ml of each culture obtained from previous section. The culture suspension was centrifuge at 12,000 rpm for 3 min. The supernatant was discarded and the cell pellet was suspended with 1 ml of molecular biology-grade water. After centrifugation at 12,000 rpm for 3 min, the supernatant was removed and the resulting pellet was obtained. One hundred microliter of molecular biology-grade water and 0.00333 mg of lysis-bead were added and mixed. The mixture was then boiled at 100°C for 15 min in heat box and centrifuged at 12,000 rpm for 3 min. An aliquot of the obtained supernatant was used as a DNA template for inclusivity and exclusivity test. The remaining supernatant was stored at -20°C for repeat of test (Supawasit *et al.* 2018).

5. Multiplex PCR condition

The optimized mPCR assay in this study was done by following Supawasit *et al.* (2018) with a few modification. Briefly, a total 50 μl of mPCR reaction consisted of 1X PCR buffer, 300 μM of dNTP, 2.5 U of *Taq* DNA polymerase, 3.0 mM of $MgCl_2$, primers (0.05 μM stx1, 0.05 μM stx2, 0.02 μM eae, 0.02 μM invA, 0.6 μM hlyA and 0.03 μM IAC), 0.5 ng/μl pUC19 template, 3 μl DNA template and molecular biology-grade water to adjust the final volume. For negative control, molecular biology-grade water was used instead of the DNA template to monitor the contamination of external DNA. The mPCR reaction was carried out in a Thermo cycle machine (Swift maxi, ESCO Micro Pte Ltd., Singapore) which consisted of a 2 min initial denaturation at 95ºC, followed by 35 cycles of denaturation at 95ºC for 30 s, annealing at 57.6ºC for 30 s and extension at 72ºC for 30 s, with a final extension at 72ºC for 7 min. The mPCR products were electrophoresed on 2.5% agarose gel in 1X Tris-Borate-EDTA buffer, stained with ethidium bromide and visualized by using a UV transilluminator (UVP Benchtop, Fisher scientific, USA). All chemicals used for the mPCR reaction and gel electrophoresis were purchased from Vivantis Technologies, USA.

6. Data analysis

The inclusivity and exclusivity of the optimized mPCR assay were done by according to modified ISO16140:2016 and the results were calculated by following formulas: inclusivity (%) = (the number of target bacterial strains testing positive in each group/the number of target bacterial strains tested in each group) X 100 and exclusivity (%) = (the number of non-target bacterial strains testing negative/the number of non-target bacterial strains tested) X 100

RESULTS AND DISCUSSION

1. Primer specificity

The specificity of five primer pairs on purified DNAs obtained from STEC, *Salmonella* spp. and *L. monocytogenes* was tested by using the optimized mPCR assay. The result is shown in Figure 1. Primer stx1, stx2 and eae generated positive DNA bands of 210, 110 and 482 bp which are specific to *stx1*, *stx2* and *eae* genes of STEC, respectively (Figure 1, Lane 1-3). Specific DNA bands at sizes of 284 and 348 bp were produced by using invA and hlyA primers specified to *invA* and *hlyA* genes of *Salmonella* spp. and *L. monocytogenes*, respectively (Figure1, Lane 4 and 5). All mPCR reactions were accuracy as the specific band of 65 bp amplified by using IAC primer was detected in every run of mPCR reactions. All primers used under the optimized mPCR assay gave relatively high specificity of detection against target genes of three target bacteria without amplification of non-specific DNA product.

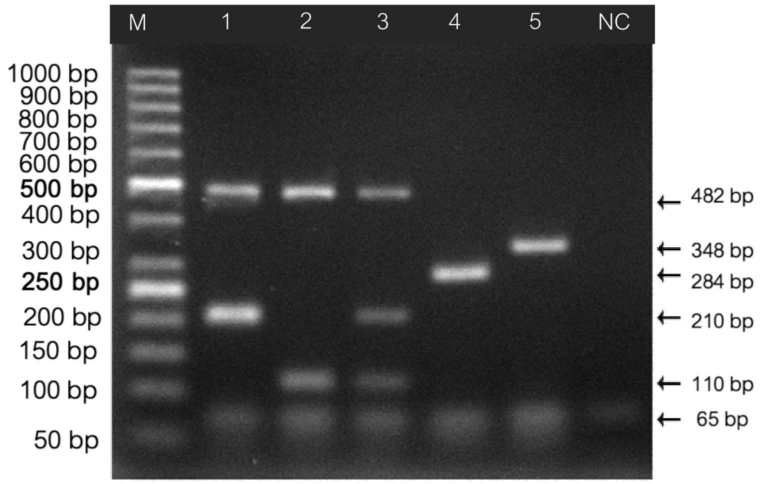


Figure 1 Specificity of primers on representatives of three target bacteria. Lane M, 100 marker base pair ladder; Lane 1, *E. coli* O103:H11 CDC 06-3008 (*stx1* and *eae*-positive); Lane 2, *E. coli* O121:H19 CDC 03-3014 (*stx2* and *eae*-positive); Lane 3, *E. coli* O26:H11 CDC 03-3014 (*stx1, stx2* and *eae*-positive); Lane 4, *S.* Enteritidis DMST 15676 (*invA*-positive) and Lane 5, *L. monocytogenes* DMST 17303 (*hlyA*-positive); Lane NC, Negative control (Molecular biology-grade water).

2. Inclusivity test

The inclusivity of the developed mPCR assay was investigated by using 159 pure cultures of target bacteria according to ISO 16140:2016. Genomic DNAs extracted from 19 strains of STEC, 93 strains of *Salmonella* spp. and 47 strains of *L. monocytogenes* were tested for the inclusivity. All positive results with specific band product for each target bacteria are obtained from all tested strains of 19 STEC, 93 *Salmonella* spp. and 47 *L. monocytogenes* (Figure 2A-2C). Interestingly, some isolated STEC strains in Thailand carry *stx1* gene or *stx2* gene only while some STEC strains carry both genes. In addition, some STEC carry no *eae* gene or *eae* gene combined with *stx1* gene or *stx2* gene. Furthermore, small length of the PCR product at approximately 50 bp was observed in some *L. monocytogenes* strains. One possible explanation for such phenomenon is that DNAs with high concentration were obtained and fragmented into small pieces during extraction)Pecenka *et al*., 2020). Therefore, specificity tests of three target bacteria gave the identical 100% inclusivity (Table 2).

Table 2 STEC, *Salmonella* spp. and *L. monocytogenes* inclusivity and percentage results.

Strains	Strain number tested	Positive number (%)
STEC	47	47 (100%)
Salmonella spp.	93	93 (100%)
L. monocytogenes	47	47 (100%)

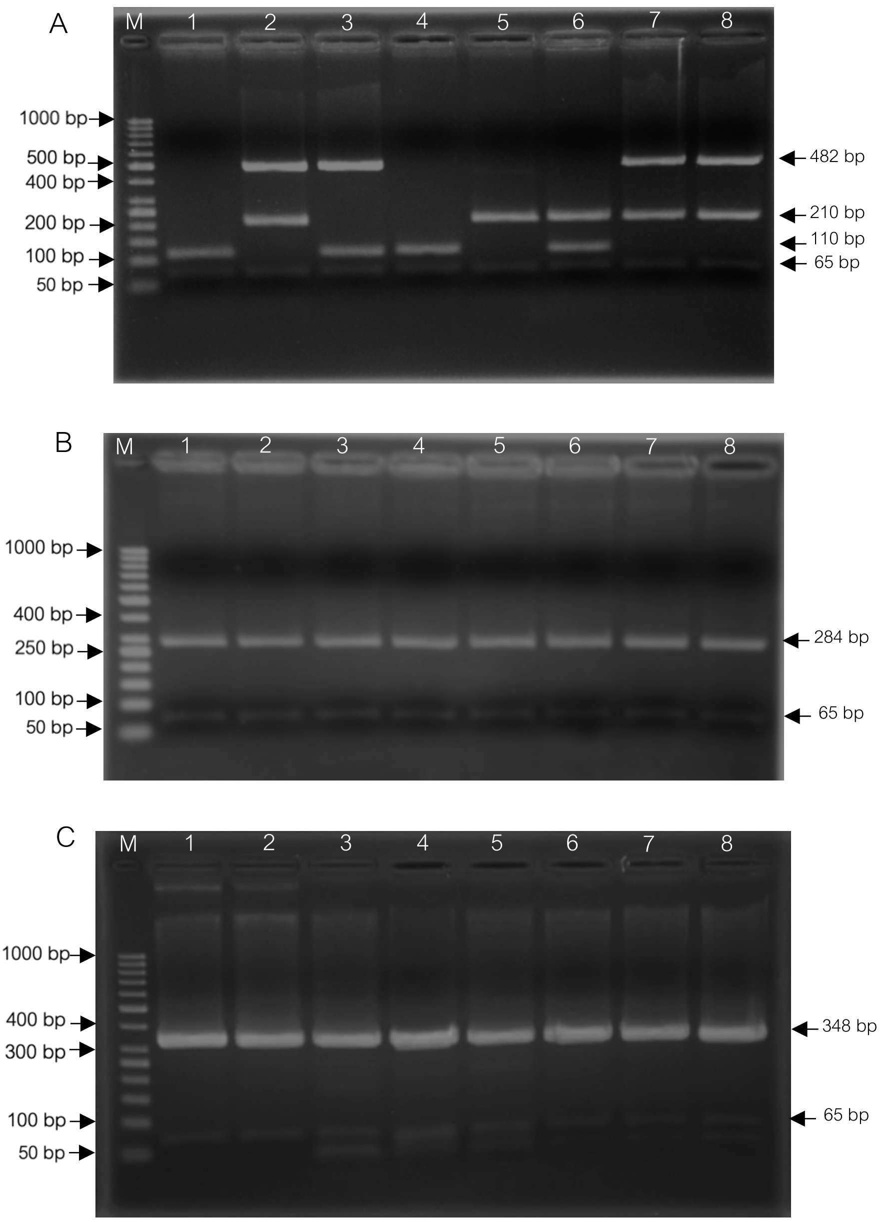


Figure 2 Some representative results for inclusivity test of three target bacteria. Lane M, 100 marker base pair ladder; A: STEC strains; Lane 1, *E. coli* DMST 30536 (*stx2*-positive); Lane 2, *E. coli* DMST 30537 (*stx1* and *eae*-positive); Lane 3, *E. coli* DMST 50662 (*stx2* and *eae*-positive); Lane 4, *E. coli* DMST 19340 (*stx2*-positive); Lane 5, *E. coli* DMST 50659 (*stx1*-positive); Lane 6, *E. coli* DMST 50661 (*stx1* and *stx2*-positive); Lane 7, *E. coli* DMST 30539 (*stx1* and *eae*-positive); Lane 8, *E. coli* DMST 50660 (*stx1* and *eae*-positive), B: *Salmonella* spp. strains; Lane 1, *S.* Paratyphi A DMST 15673; Lane 2, *S.* Bovismorbificans DMST 17379; Lane 3, *S.* Derby DMST 16879; Lane 4, *S.* London DMST 7110; Lane 5, *S.* Newport DMST 15675; Lane 6, *S.* Aberdeen DMST 19198; Lane 7, *S.* Alachua DMST 19203; Lane 8, *S.* Bergen DMST 19206 and C: *L. monocytogenes* strains; Lane 1, *L. monocytogenes* DMST 17303; Lane 2, *L. monocytogenes* DMST 20093; Lane 3, *L. monocytogenes* DMST 41455; Lane 4, *L. monocytogenes* DMST 31799; Lane 5, *L. monocytogenes* DMST 31801; Lane 6, *L. monocytogenes* DMST 37885; Lane 7, *L. monocytogenes* DMST 41456; Lane 8, *L. monocytogenes* DMST 23710).

3. Exclusivity test

The exclusivity of mPCR assay was performed on 30 non-target bacteria. All non-target bacteria tested gave no amplified products while only specific DNA band product generated by IAC primer was observed (Figure 3). Therefore, 100% exclusivity was obtained. All primers used for three target bacteria show significantly high specificity for detection of STEC, *Salmonella* spp. and *L. monocytogenes* under the optimized mPCR assay.

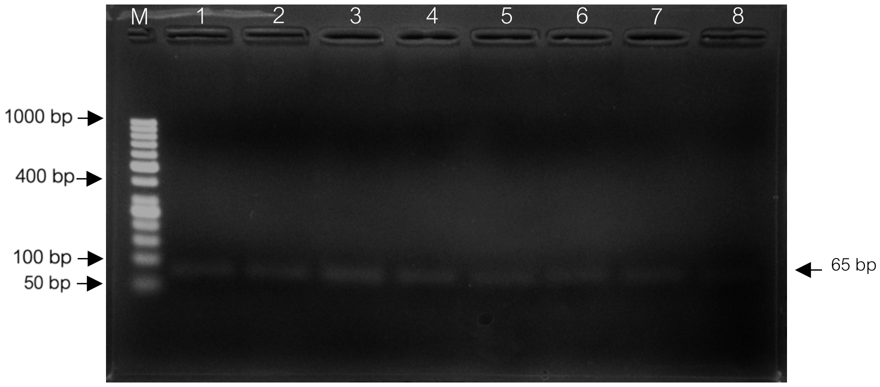


Figure 3 Some representative results for exclusivity test of non-target bacteria. Lane M, 100 marker base pair ladder; Lane 1-8, *A. hydrophila* DMST 21250, non-pathogenic *E. coli*; *P. pentosaceus* DMST 18752; *V. parahaemolyticus* DMST 21243; *L. innocua* DMST 9011; *L. ivanovii* DMST 9012; *V. vulnificus* DMST 21245; *Y. enterocolitica* DMST 16385 and *S. pyogenes*.

CONCLUSIONS

The specific primers used in this study were tested for inclusivity and exclusivity under the optimized mPCR assay according to ISO 16140-2: 2016. One hundred percentage of inclusivity and exclusivity were obtained from a total of 189 strains including target and non-target bacteria. The results indicated that these primers exhibit relatively high specificity for detection of STEC, *Salmonella* spp. and *L. monocytogenes*. However, several strains of each target bacteria are needed to be tested in order to fully complete with the criteria of inclusivity study of ISO 16140-2: 2016.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research work was fully funded from the Agricultural Research Development Agency (ARDA), Bangkok, Thailand (grant number CRP6105021630). The authors sincerely thank the Department of Food Science and Technology, Kasetsart University, Bangkok, Thailand for equipment.

REFERENCES

Bacteriological Analytical Manual. 2019. **Bacteriological Analytical Manual (BAM).** Available Source: https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bacteriological-analytical-manual-bam, May 20, 2019.

Centers of Disease Control and Prevention. 2019. **Foodborne outbreaks.** Available Source: https://www.cdc.gov/foodsafety/outbreaks/multistate-outbreaks/outbreaks-list.html, October 20, 2019.

International Organization for Standardization. 2016. **ISO 16140-2, Microbiology of the food chain-method validation-Part 2: Protocol for the validation of alternative (proprietary) methods against a reference method.** ISO, Switzerland.

Li, B. and J.Q. Chen. 2012. Real-time PCR methodology for selective detection of viable *Escherichia coli* O157:H7 cells by targeting Z3276 as a genetic marker. **Applied Environmental Microbiology.** 78(15): 5297-5304.

Liu, P., H. Mizue, K. Fujihara, H. Kobayashi, H. Kamikado, T. Tanaka, K. Honjoh and T. Miyamoto. 2012. A new rapid real-time PCR method for detection of *Listeria monocytogenes* targeting the *hlyA* gene. **Food Scicence Technology Research.** 18(1):47-57.

Meng, J., S. Zhao, P.M. Doyle, E.S. Mitchell and S. Kresovich. 1997. A multiplex PCR for identifying Shiga like toxin-producing *Escherichia coli* O157:H7. **Letter in Applied Microbiology.** 24:172-176.

Pal, A., S. Ghosh, T. Ramamurthy, S. Yamasaki, T. Tsukamoto, S.K. Bhattacharya, G. Balakrish Nair and Y. Takeda. 1999. Shiga toxin-producing *Escherichia coli* from healthy cattle in a semi-urban community in Calcutta, India. **Indian Journal of Medical Research.** 110:83-85.

Pecenka, J., M. Kocanova, M. Baranek, F. Gazdík, L. Ragasova, E. Penazova, J. Cechova, P. Beran and Ales Eichmeier. 2020. Species-specific PCR primers for the detection of poorly distinguishable *Xanthomonas euvesicatoria.* **Crop protection.** 127: 104978.

Rahn K., S.A. De Grandis, R.C.Clarke, S.A. McEwen, J.E. Galin, C. Ginocchio, R. Curtiss and C.L. Gyles. 1992. Amplification of an *invA* gene sequence of *Salmonella* Typhimurium by polymerase chain reaction as a specific method of *Salmonella*. **Molecular Cell Probes.** 6:271-279.

Supawasit, W., D. Bundidamorn and S. Trevanich. 2018. Effect of K_2HPO_4-modified buffer in simultaneous enrichment broth for improvement of multiplex PCR for detection of Shiga toxin-producing *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. and *Listeria* monocytogenes, pp. In **Proceeding of the 6th International conference on creative technology.** 24-26 July 2018, Cholchan Pattaya Beach Resort, Pattaya, Chonburi, Thailand.

Vidal, R., M. Vidal, R. Lagos, M. Levine and V. Prado. 2004. Multiplex PCR for Diagnosis of Enteric Infections Associated with Diarrheagenic *Escherichia coli*, **J Clin Microbiol.** 42(4):1787-1789.

Vencia, W., C. Nogarol, D.M. Bianchi, S. Gallina, F. Zuccon, D. Adriano, M. Gramaglia and L. Decastelli. 2014. Validation according to ISO 16140:2003 of a commercial real-time PCR-based method for detecting *Campylobacter jejuni*, *C. coli*, and *C. lari* in foods, **International Journal of Food Microbiology.** 177: 78-80.

World health organization. 2018a. ***E. coil.*** Available Source: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/e-coli, August 14, 2019.

World health organization. 2018b. **Listeriosis.** Available Source: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/listeriosis, August 14, 2019.

World health organization. 2018c. ***Salmonella* (non-typhoidal).** Available Source: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/salmonella-(non-typhoidal), August 14, 2019.

Xu, Y.G., Z.M. Liu, B.Q. Zhang, M. Qu, C.S. Mo, J. Luo and S.L. Li. 2016. Development of a novel target-enriched multiplex PCR (Tem-PCR) assay for simultaneous detection of five foodborne pathogens. **Food Control.** 64: 54-59.

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาของเครื่องดื่มน้ำนมข้าว เมื่อผ่านกระบวนการความดันสูง

Study of Quality Changes of Rice Beverage after Treated by High Pressure Processing During Extended Storage

ณัฐสินี ด้วงแก้ว[1] วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ[1*] ปิติพร ฤทธิเรืองเดช[1] และ พันธ์สิริ สุทธิลักษณ์[2]

Natsinee Duangkaew[1], Wannasawat Ratphitagsanti[1*], Pitiporn Ritthiruangdej[1] and Phunsiri Suthiluk[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความดันสูง (HPP) ที่ระดับความดัน 600 MPa เป็นเวลา 10 นาที และตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นของเครื่องดื่มน้ำนมข้าว 4 สูตร ได้แก่ น้ำนมข้าวที่ผลิตจากข้าวหุงสุก (เติมและไม่เติมกะทิ) และน้ำนมข้าวที่ผลิตจากข้าวที่ผ่านการแช่น้ำ (เติมและไม่เติมกะทิ) เปรียบเทียบกับน้ำนมข้าวที่ไม่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ และการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 10 นาที ผลการทดลองพบว่า ความเป็นกรด-เบสของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ด้วย HPP มีค่าอยู่ในช่วงอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ (7.26±0.38) คุณภาพด้านกายภาพของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 8 สัปดาห์ สำหรับคุณภาพด้านจุลินทรีย์พบว่า HPP ที่อุณหภูมิห้องลดจำนวนจุลินทรีย์ได้น้อยกว่า 1 log CFU/ml และความดันยังกระตุ้นให้เกิดการงอกของสปอร์ของแบคทีเรียที่อาจปนเปื้อนมาในวัตถุดิบอีกด้วย

ABSTRACT

This research monitored the effects of high pressure processing (HPP) at 600MPa for 10min on changes of physical, chemical and microbial properties during refrigerated storage of 4 formulation of rice milk beverage made of either cooked rice or soaked rice (with and without coconut milk). Results were compared with the untreated control and heat pasteurized sample at 95°C for 10min. pH of pressurized rice beverage was classified as low-acid food (7.26±0.38). Physical properties of rice beverage were not significantly different throughout 8weeks storage at chilled temperatures (p>0.05). For the microbial quality, it was found that HPP at room temperature reduced the microbial population less than 1 log CFU/ ml. In addition, pressure seemed to activate the germination of bacterial spores that were potentially contaminated in raw material.

Key words: rice beverage, plant-based, high pressure processing, coconut milk, storage time

* Corresponding author; e-mail address: **wannasawat.r@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง เชียงราย 57100

[2]School of Agro-Industry, Mae Fah Luang University, Chiang Rai 57100

คำนำ

ในอุตสาหกรรมอาหารนิยมใช้การแปรรูปด้วยความร้อน (heat processing) เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร และยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ แต่ความร้อนทำลายสารอาหารที่ไวต่อความร้อน เช่น วิตามิน รวมทั้งทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหารเปลี่ยนแปลงไป เช่น สี กลิ่น รสชาติ (Swamy *et al.*, 2018) ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่ไม่ใช้ความร้อน (nonthermal technology) เพื่อยืดอายุผลิตภัณฑ์อาหารโดยทำลายเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค และยังคงความสดใหม่ (fresh-like product) ของอาหารนั้นๆ (Barba *et al.*, 2017; Santhirasegaram *et al.*, 2015) กระบวนการความดันสูง (high pressure processing, HPP) เป็นกระบวนการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้ความดันสูงและไม่ใช้ความร้อน (Gupta and Balasubramaniam, 2012; Swamy *et al.*, 2018) HPP สามารถใช้ได้กับทั้งอาหารประเภทของแข็ง ของเหลว หรืออาหารในบรรจุภัณฑ์ (in-package pasteurization) โดยไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของอาหาร แต่อาหารที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ต้องเก็บรักษาโดยการแช่เย็น เพื่อรักษาคุณภาพและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสีย (Augusto *et al.,* 2018) ปัจจุบันนี้เครื่องดื่มจากพืช (plant-based beverage) กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น สำหรับผู้ที่แพ้นมวัว ผู้ที่ทานมังสวิรัติ และผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ น้ำนมข้าวผลิตจากข้าวที่เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย ข้าวนิยมใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตน (gluten-free product) เนื่องจากโปรตีนจากข้าวไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ (Amagliani *et al.*, 2017) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการพาสเจอร์ไรส์เครื่องดื่มน้ำนมข้าวด้วยกระบวนการความดันสูงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวสูตรต่างๆ ตลอดการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ที่อุณหภูมิแช่เย็น โดยเปรียบเทียบกับเครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่ไม่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ และผ่านการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อน

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมเครื่องดื่มน้ำนมข้าว

งานวิจัยนี้ใช้ข้าวกล้องหอมมะลิในการเตรียมเครื่องดื่มน้ำนมข้าว ศึกษาการเตรียมน้ำนมข้าว 2 วิธี ได้แก่ การเตรียมน้ำนมข้าวด้วยวิธีการหุงข้าว และการเตรียมน้ำนมข้าวด้วยวิธีการแช่ข้าว โดยเริ่มจากล้างข้าวกล้องหอมมะลิด้วยน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis, RO) จำนวน 3 ครั้ง และสะเด็ดน้ำด้วยกระชอน

1.1 การเตรียมน้ำนมข้าวด้วยวิธีการหุงข้าว นำข้าวกล้องที่ล้างสะอาดแล้วมาหุงกับน้ำ RO อัตราส่วนข้าวกล้องต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 2 โดยใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้า (Sharp Thai Co., Ltd., Thailand) รอจนกระทั่งข้าวสุก ปั่นข้าวกล้องหุงสุกกับน้ำ RO ในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 8 ด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ไฟฟ้า (Philips Electronics Co., Ltd., Thailand) เป็นเวลา 2 นาที กรองน้ำนมข้าวด้วยกระชอนและผ้าขาวบาง ได้น้ำนมข้าว

1.2 การเตรียมน้ำนมข้าวด้วยวิธีการแช่ข้าว แช่ข้าวกล้องด้วยน้ำ RO ในอัตราส่วนข้าวกล้องต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 2 เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ข้าวกล้องดูดซึมน้ำและนิ่มลง เมื่อครบเวลา สะเด็ดน้ำ ปั่นข้าวกล้องกับน้ำ RO ในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 6 ด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ไฟฟ้าเป็นเวลา 2 นาที กรองน้ำนมข้าวด้วยกระชอนและผ้าขาวบาง ได้น้ำนมข้าว

นำน้ำนมข้าวที่ผ่านการเตรียมในขั้นตอนที่ 1.1 หรือ 1.2 มาผสมน้ำเชื่อมแก่นตะวันร้อยละ 1.5 และกะทิร้อยละ 8 ได้เครื่องดื่มน้ำนมข้าว 4 สูตร ได้แก่ น้ำนมข้าวหุงสุก (Cooked rice milk, CN) น้ำนมข้าวหุงสุกผสมกะทิ (Cooked rice milk with coconut milk, CC) น้ำนมข้าวแช่ (Soaked rice milk, SN) น้ำนมข้าวแช่ผสมกะทิ (Soaked rice milk with coconut milk, SC) ให้ความร้อนแก่เครื่องดื่มน้ำนมข้าว ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เพื่อละลายแจลแลนกัม (gellan gum) ร้อยละ 0.01 และเพิ่มความคงตัวให้แก่น้ำนมข้าว

2. การพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อนและกระบวนการความดันสูง

เมื่อผสมเครื่องดื่มน้ำนมข้าว นำเครื่องดื่มน้ำนมข้าวไปพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อนหรือความดันสูง ดังนี้

2.1 การพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อน ให้ความร้อนแก่เครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบเวลาทำให้เย็นลงทันทีด้วยอ่างน้ำผสมน้ำแข็ง จากนั้นบรรจุในขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) ปริมาตร 130 มิลลิลิตร

2.2 การพาสเจอร์ไรส์ด้วยกระบวนการความดันสูง บรรจุน้ำนมข้าวใส่ขวด PET กระบวนการความดันสูง (Bao Tou KeFa High Pressure Technology Co., Ltd., China) ที่ระดับความดัน 600 เมกะปาสคาล (MPa) เป็นเวลา 10 นาที สำหรับพาสเจอร์ไรส์เครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้น้ำ RO เป็นสารแลกเปลี่ยนความดัน

3. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวระหว่างการเก็บรักษา

เก็บรักษาเครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิแช่เย็น (4-8°C) ตรวจสอบคุณภาพของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวด้านต่างๆ ทุกสัปดาห์เป็นเวลา 8 สัปดาห์ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวเปรียบเทียบกันระหว่างน้ำนมข้าวที่ไม่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ (untreated control, UC) พาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 10 นาที (heat) และพาสเจอร์ไรส์ด้วยความดันสูงที่ระดับความดัน 600 MPa เป็นเวลา 10 นาที (HPP)

3.1 คุณภาพทางกายภาพและเคมี วิเคราะห์ค่าสีด้วยระบบ CIEL*a*b *โดยใช้เครื่องวัดค่าสี (CR-10, Konica Minolta, Inc., Japan) จากนั้นคำนวณเป็นค่าดัชนีความขาว (whiteness index; WI) ตามสมการที่ 1

$$\text{Whiteness Index} = 100 - \sqrt{(100-L)^2 + (a^2 + b^2)} \qquad (1)$$

วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ด้วยเครื่องวัด pH แบบดิจิตอล (Binder, Scientific Promotion Co., Ltd.) วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid, TSS) ด้วยเครื่องมาตรดัชนีหักเห (digital refractometer, ATAGO, Japan) ที่อุณหภูมิไม่เกิน 25°C บันทึกผลเป็นองศาบริกซ์ (°Brix) วิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content) โดยนำเครื่องดื่มน้ำนมข้าวปริมาตร 10 มิลลิลิตรทำให้แห้งด้วยด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 105±2°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ วิเคราะห์ร้อยละการตกตะกอน นำเครื่องดื่มน้ำนมข้าวปั่นเหวี่ยงที่อุณหภูมิ 4°C ความเร็วรอบ 10,000xg เป็นเวลา 15 นาที วิเคราะห์ความหนืด นำเครื่องดื่มน้ำนมข้าวปริมาตร 16 มิลลิลิตร โดยเครื่องวัดความหนืด Brookfield viscometer (DV-III, Brookfield engineering laboratories, Inc., USA) ที่อุณหภูมิไม่เกิน 8°C ด้วยหัววิเคราะห์แบบ UL adapter spindle

3.2 คุณภาพทางจุลินทรีย์ วิเคราะห์ค่าคุณภาพทางจุลินทรีย์ ได้แก่ ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total plate count) และ ปริมาณยีสต์และราด้วยวิธี standard plating ใช้สารละลายเปปโทน (peptone water, Merck KgaA, Germany) สำหรับเจือจางตัวอย่างเพื่อให้มีปริมาณจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 25-250 โคโลนี

นำข้อมูลที่ได้จากการวัดค่า วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้วิธี ANOVA (Analysis of Variance) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับนัยสำคัญ 95 % ด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชั่น 12.0 เพื่อเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงในระหว่างเก็บรักษาเครื่องดื่มน้ำนมข้าว

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการพาสเจอร์ไรส์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพและเคมีของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวระหว่างการเก็บรักษา

ค่า pH ของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวทุกสูตรตลอดการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นเท่ากับ 7.26±0.38 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มเครื่องดื่มที่มีความเป็นกรดต่ำ (ค่า pH มากกว่า 4.6) ค่า pH ของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่ไม่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ (untreated control, UC) เท่ากับ 7.53±0.09, 7.31±0.03, 7.14±0.01 และ 7.27±0.01 สำหรับเครื่องดื่มน้ำนมข้าวสูตร CN, CC, SN และ SC ตามลำดับ เมื่อเก็บรักษาเครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่อุณหภูมิแช่เย็นสูตร CN สภาวะ UC แสดงให้เห็นว่าค่า pH ของลดลงเป็น 6.02±0.01 เมื่อเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์สัมพันธ์กับปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นแบคทีเรียที่สร้างกรด ค่า pH ของเครื่องดื่มจึงลดลง และมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.35±0.45 ตลอดอายุการเก็บรักษา CN สภาวะ heat และ CN สภาวะ HPP มีค่า pH คงที่อยู่ในช่วง 7.32±0.12 และ 7.74±0.11 ตามลำดับ (Figure 1) ในงานวิจัยอื่นพบว่า pH ของนมถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการ HPP (400, 500 และ 600 MPa เป็นเวลา 1 และ 5 นาที) ไม่เปลี่ยนแปลงมีค่าอยู่ในช่วง 6.7-7.0 ในขณะที่นมถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ ค่า pH ลดลงเหลือ 4.8 เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 28 วัน (Smith *et al.*, 2009)

ค่าสีของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวแสดงผลเป็น L*, a* และ b* จากนั้นคำนวณเป็นดัชนีความขาว (whiteness index) ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์พบว่าเครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่ผลิตจากข้าวหุงสุก มีความโปร่งแสงมากกว่าและดัชนีความขาวน้อยกว่าเครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่ผลิตจากข้าวแช่ มีค่าเท่ากับ 44.96±1.03 (CN) และ 47.54±0.76 (SN) เมื่อเพิ่มกะทิลงในเครื่องดื่มน้ำนมข้าวทำให้ดัชนีความขาวของเครื่องดื่มเพิ่มขึ้นเป็น 64.52±0.92 (CC) และ 62.99±1.15 (SC) ดัชนีความขาวของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวทุกสูตร (CN, CC, SN และ SC) และทุกสภาวะการฆ่าเชื้อ (UC, heat และ HPP) ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ตลอดอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิแช่เย็น

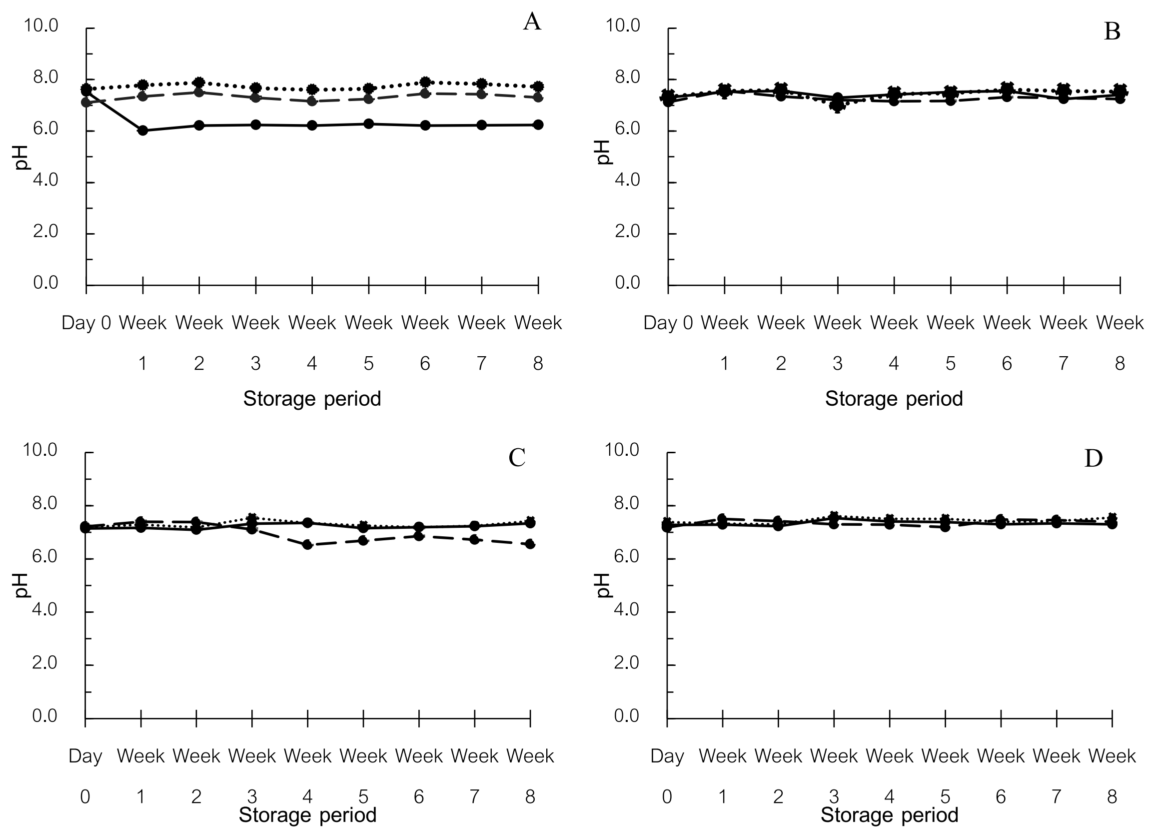


Figure 1 pH of rice beverage during storage time; cooked rice beverage CN (A) and CC (B); soaked rice beverage, SN (C) and SC (D); Untreated control (—); heat (---); HPP (···) .

TSS ของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวสภาวะ UC เท่ากับ 2.4±0.2°Brix (CN), 3.1±0.1°Brix (CC), 1.7±0.1°Brix (SN) และ 2.0±0.1°Brix (SC) เครื่องดื่มน้ำนมข้าวสภาวะ heat มีค่า TSS สูงกว่าเล็กน้อย เท่ากับ 3.1±0.1°Brix (CN), 3.2±0.1°Brix (CC), 1.8±0.1°Brix (SN) และ 2.2±0.1°Brix (SC) เนื่องจากการให้ความร้อนแก่เครื่องดื่มน้ำนมข้าวเป็นเวลานาน อาจทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยปกติแล้วการใช้ความร้อนจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี สารอาหาร และคุณภาพต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ เช่น ค่า TSS และความหนืด (Fellows, 2000) และเครื่องดื่มน้ำนมข้าวสภาวะ HPP มีค่า TSS เท่ากับ 2.5±0.1°Brix (CN), 3.1±0.1°Brix (CC), 1.6±0.2°Brix (SN) และ 2.0±0.2°Brix (SC)

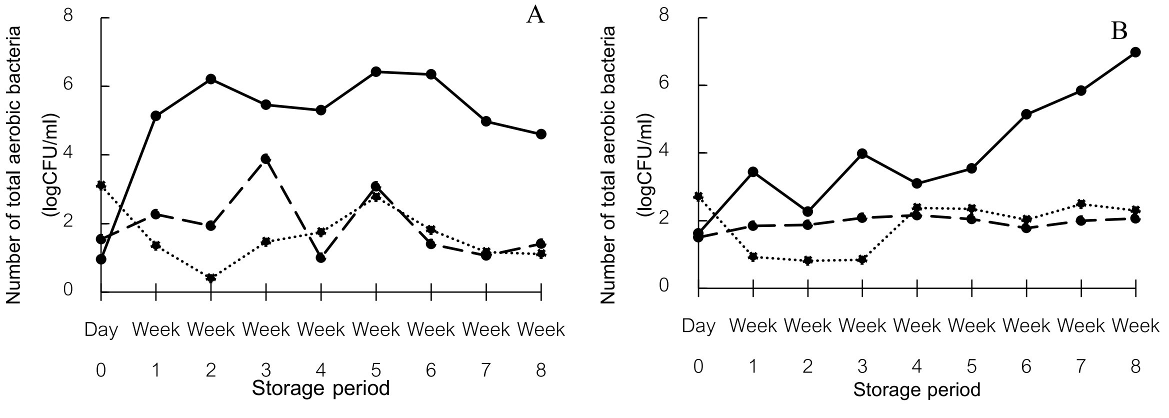
ปริมาณของแข็งทั้งหมดวิเคราะห์จากการอบด้วยเตาอบลมร้อนเพื่อกำจัดน้ำออกจากเครื่องดื่มน้ำนมข้าว ซึ่งจะรวมทั้งของแข็งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ปริมาณของแข็งทั้งหมดของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการเก็บรักษา 8 สัปดาห์ เครื่องดื่มน้ำนมข้าวสูตร CC มีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากที่สุด เท่ากับ ร้อยละ 5.42±0.08, 5.11±0.04 และ 5.22±0.13 ในขณะที่สูตร SN มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 2.62±0.09, 2.82±0.10 และ 3.02±0.03 ที่สภาวะการฆ่าเชื้อ heat และ HPP เปรียบเทียบกับ UC ตามลำดับ

น้ำนมข้าวประกอบด้วยแป้งและน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก เครื่องดื่มน้ำนมข้าวจึงตกตะกอนเมื่อตั้งทิ้งไว้ แจลแลนกัมทำหน้าที่เป็นสเตบิไลเซอร์ (stabilizer) ช่วยทำให้เครื่องดื่มน้ำนมข้าวคงตัวมากขึ้น การใช้ความร้อนในการพาสเจอร์ไรส์เครื่องดื่มน้ำนมข้าวมีความคงตัวเพิ่มขึ้น ปริมาณตะกอนมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นเป็นเวลา 8 สัปดาห์ เครื่องดื่มน้ำนมข้าวสูตร CN, CC, SN และ SC สภาวะ heat มีปริมาณตะกอนร้อยละ 21.61±0.41, 24.01±1.67, 28.04±0.76 และ 36.17±1.04

ตามลำดับ ซึ่งมีผลเป็นแนวโน้มเดียวกับความหนืด ความหนืดของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวสภาวะ heat มีความหนืดมากกว่าสภาวะ UC และ HPP เครื่องดื่มสูตร SN มีความหนืดเพิ่มขึ้นจาก 14.53±3.99 (สัปดาห์ที่ 4) เป็น 20.43±0.40 mPa.s (สัปดาห์ที่ 5) และ SC มีความหนืดเพิ่มขึ้นจาก 203.25±17.95 (สัปดาห์ที่ 2) เป็น 293.58±1.65 mPa.s (สัปดาห์ที่ 3) เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น

ผลของการพาสเจอร์ไรส์ต่อคุณภาพทางจุลินทรีย์ของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวระหว่างการเก็บรักษา

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้นจาก ~1.0 log CFU/ml เป็น ~5.1 log CFU/ml (CN) และจาก ~1.6 log CFU/ml เป็น ~3.4 log CFU/ml (CC) หลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 1 สัปดาห์ที่อุณหภูมิแช่เย็น และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเก็บรักษานานขึ้น ในขณะที่เครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยสภาวะ heat และ HPP ปริมาณจุลินทรีย์ค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ส่วนเครื่องดื่มน้ำนมข้าวแช่ ปริมาณจุลินทรีย์สภาวะ heat มีปริมาณจุลินทรีย์มากกว่า สภาวะ UC แต่การฆ่าเชื้อด้วยสภาวะ HPP สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ลงเหลือน้อยกว่า 1 log CFU/ml (Figure 2C) ในช่วงสุดท้ายของการเก็บรักษาน้ำนมข้าว (8 สัปดาห์) เครื่องดื่มน้ำนมข้าวสูตร SN พบปริมาณจุลินทรีย์ ~2.8, ~4.5 และ ~1.7 log CFU/ml และเครื่องดื่มน้ำนมข้าวสูตร SC พบปริมาณจุลินทรีย์ ~2.5, ~1.6 และ ~4.1 log CFU/ml ในสภาวะการฆ่าเชื้อ UC, heat และ HPP ตามลำดับ จุลินทรีย์ที่พบในเครื่องดื่มน้ำนมข้าวอาจเป็น *Bacillus cereus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างสปอร์ได้ พบได้บ่อยในอาหารประเภทข้าว ธัญชาติ และเครื่องเทศ บางสายพันธุ์พบในอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ อาหารแช่เย็น และอาหารที่มีนมเป็นส่วนประกอบ (Carlin *et al*., 2000) การที่ HPP ไม่สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ให้อยู่ในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบได้ อาจมีสาเหตุมาจากมีสปอร์ปนเปื้อนในข้าวกล้องที่ใช้เป็นวัตถุดิบ และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (temperature gradient) ขณะเตรียมเครื่องดื่มน้ำนมข้าว อีกทั้งความดันยังกระตุ้นให้เกิดการงอกของสปอร์อีกด้วย (Evelyn and Silva, 2019) ปริมาณยีสต์และราในเครื่องดื่มน้ำนมข้าวพบในสูตร CC สภาวะ UC ~2.8 log CFU/ml (สัปดาห์ที่ 4),สูตร CC สภาวะ HPP ~1 log CFU/ml (สัปดาห์ที่ 7), สูตร SN สภาวะ UC ~2.0 log CFU/ml (สัปดาห์ที่ 5) และสูตร SC สภาวะ heat ~3.2 log CFU/ml (สัปดาห์ที่ 6) (Figure 2) นอกจากนั้นไม่พบยีสต์และราในเครื่องดื่มน้ำนมข้าวสูตรและสภาวะอื่นๆ



C D

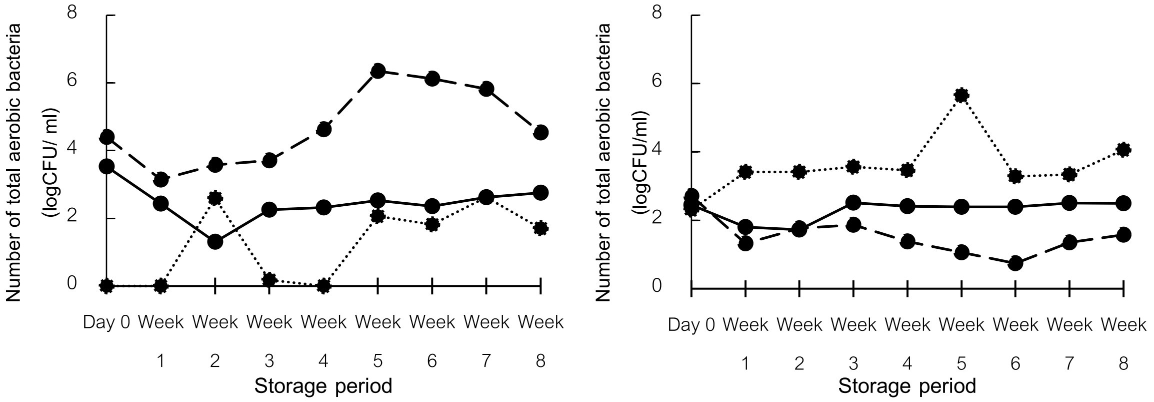


Figure 2 Number of total aerobic bacteria (log CFU/ ml) of rice beverage during storage time; cooked rice beverage CN (A) and CC (B); soaked rice beverage, SN (C) and SC (D); Untreated control (──); heat (– – –); HPP (······) .

สรุป

กระบวนการความดันสูงสามารถรักษาคุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส ค่าสี ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณตะกอน และความหนืดของเครื่องดื่มน้ำนมข้าวทั้ง 4 สูตรได้ใกล้เคียงกับเครื่องดื่มน้ำนมข้าวที่ไม่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ เมื่อเปรียบเทียบกับการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 10 นาที ตลอดอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ถึงแม้ว่า HPP ไม่สามารถลดปริมาณเชื้อลงให้อยู่ในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบได้ เนื่องจากอาจมีสปอร์ของแบคทีเรียปนเปื้อนมาในวัตถุดิบ งานวิจัยเพิ่มเติมจึงควรศึกษาเกี่ยวกับการใช้ความร้อนร่วมกับความดันในการยับยั้งจุลินทรีย์ และสปอร์ของจุลินทรีย์ในเครื่องดื่มน้ำนมข้าวต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University Research and Development Institute; KURDI) ภายใต้ชุดโครงการวิจัยเมืองนวัตกรรมอาหารภาคกลาง

เอกสารอ้างอิง

Augusto, P.E.D., A.A.L. Tribst. and M. Cristianini. 2018. High Hydrostatic Pressure and High-Pressure Homogenization Processing of Fruit Juices, pp. 393-421. *In* G. Rajauria and B. K. Tiwari, eds. **Fruit Juices.** Academic Press, San Diego.

Barba, F.J., L.R.B. Mariutti, N. Bragagnolo, A.Z. Mercadante, G.V. Barbosa-Cánovas and V. Orlien. 2017. Bioaccessibility of bioactive compounds from fruits and vegetables after thermal and nonthermal processing. **Trends in Food Science and Technology** 67: 195-206.

Carlin, F., H. Girardin, M.W. Peck, S.C. Stringer, G.C. Barker, A. Martínez, A. Fernandez, P. Fernandez, W.M. Waites and S. Movahedi. 2000. Research on factors allowing a risk assessment of spore-forming pathogenic bacteria in cooked chilled foods containing vegetables: a FAIR collaborative project. **International journal of food microbiology** 60: 117-135.

Evelyn and F.V.M. Silva. 2019. Heat assisted HPP for the inactivation of bacteria, moulds and yeasts spores in foods: Log reductions and mathematical models. **Trends in Food Science and Technology** 88: 143-156.

Fellows, P. 2000. **Food processing technology principles and practice 2nd Edn**. Oxford Brookes University, Woodhead Publishing Limited, New York, USA.

Gupta, R. and V. Balasubramaniam. 2012. High-pressure processing of fluid foods, pp. 109-133. *In* P. Cullen, B. K. Tiwari and V. Valdramidis, eds. **Novel thermal and non-thermal technologies for fluid foods.** Elsevier.

Santhirasegaram, V., Z. Razali, D.S. George and C. Somasundram. 2015. Effects of Thermal and Non-thermal Processing on Phenolic Compounds, Antioxidant Activity and Sensory Attributes of Chokanan Mango (*Mangifera indica* L.) Juice. **Food and Bioprocess Technology** 8: 2256-2267.

Smith, K., A. Mendonca and S. Jung. 2009. Impact of high-pressure processing on microbial shelf-life and protein stability of refrigerated soymilk. **Food Microbial** 26: 794-800.

Swamy, G. J., K. Muthukumarappan and S. Asokapandian. 2018. Ultrasound for Fruit Juice Preservation, pp. 451-462. *In* G. Rajauria and B. K. Tiwari, eds. **Fruit Juices.** Academic Press, San Diego.

Scale Down Method and Determination of the Best Condition of Vacuum Tumbling for Cooked Frozen Chicken Breast Strips

Picchapa Harnkasem[1] and Sirichai Songsermpong[1*]

ABSTRACT

Nowadays marination is a process that is widely used in the poultry industry to add value and improve texture of chicken products. Marination can be applied to the meat through soaking or vacuum tumbling. Vacuum tumbling is one of the unit operations that is important to increase tenderness and increase yield on meat products. The aim of this research was to study the scale down method and determine the best condition of vacuum tumbling to increase efficiency and yield. Comparison of quality between industrial scale and lab scale was studied. Quality such as absorption percentage, salt concentration and texture (shear force) of samples between industrial scale and lab scale was not significantly different ($p > 0.05$). Therefore, the method to scale up or scale down by using the same g number can be done. Industrial condition (3 rpm, 50 minutes) could give similar result to lab condition (8 rpm, 50 minutes). The best conditions of lab sacle vacuum tumbling was studied. There were 6 conditions at 5 rpm 50 minutes, 8 rpm at 35 and 50 minutes, 10 rpm at 20, 35 and 50 minutes that had absorption more than control condition. Texture of sample after marination and salt concentration was not significantly different from control but shear force after cooking at rotation speed of 5 rpm and marination time of 20, 35 and 50 minutes, was significantly different from control ($p < 0.05$). Color value (L*, a* and b*) was significantly different between each condition. The best condition was 8 rpm 35 minutes that can reduce 15 minutes of marination time and increase the absorption of marinate solutions. This knowledge is valuable for the meat industry to scale up or scale down the tumbling process and to study the optimization of the lab scale vacuum tumbling.

Key words: Marination, Tumbling, Vacuum tumbler, Chicken, Optimization

* Corresponding author; e-mail address: sirichai.so@ku.ac.th

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Marination is a process that the meat is soaked in different marinade solutions containing different concentrations of ingredients. Marination is commonly used to improve texture (tenderness), increase yield of raw meat and reduce cooking loss due to extraction of the myofibrillar proteins that absorb the water in the meat when subjected to heating (Sen *et al.,* 2005; Alvarado & McKee, 2007) The process of marination is more often done by immersion or tumbling (Gao *et al*., 2015). Tumbling is a popular method in poultry processing, marination by using a vacuum tumbler. The technique involves rotating meat and provides a physical impact to the meat product in order to increase marinade absorption thus increase yield, juiciness and tenderness of meat product. Moreover, a vacuum pump removes the air out of the tumbler, and prevents it from becoming incorporated into the protein gel structure, and creating frothy foam in place of a tacky exudates and let the marinated solution to diffuse inside the meat faster. The quality improvements have been attributed to tumbling's disruptive effect on muscle structure (Gamage *et al*., 2017). Studying in the chicken company, the problems were the industry doesn't know how to scale up or down the vacuum tumbling process and how to determine the optimum condition for a particular meat and marinate solutions. The scale down method is to reduce scale of vacuum tumbler from industrial scale to lab scale. This method used the centrifugal force over gravity force (G number) to make sure that vacuum tumbling process in industrial scale and lab scale provides similar centrifugal force to chicken product. Beneficial effects of scale down method were that it could be studied on small batch, reducing cost for investigation of the new condition and have similar result when scale up. For the best conditions of lab sacle vacuum tumbling was studied, by determining chicken breast srtip quality, high absorption and increased lightness and redness and lower shear force.Therefore, the objective was to study scale down method from the industrial condition to lab scale condition and determine the best condition in the lab scale of vacuum tumbling for cooked frozen chicken breast strips.

MATERIALS AND METHODS

1. Scale up and scale down method

The concept of G number is used for the scale up or down. Equation of G number is shown in equation 1.

$$G_{Number} = \frac{f_c}{f_g} = \frac{0.11rN^2}{g} \qquad (1)$$

Where G_{Number} represents the centrifugal force over gravity force, r represents radius (m) of vacuum tumbler, N represents the rotation speed (rpm) and g represents the standard gravity.

Table 1 shows rotation speed of vacuum tumbler between industrial vacuum tumbler (r = 1m) and lab vacuum tumbler (r = 0.15 m) in the same G number using for scale up and scale down.

Table 1 G number and rotation speed of vacuum tumbler of industrial and lab scale.

Industrial scale (Industrial vacuum tumbler)	G number	Lab scale (Lab vacuum tumbler)
2 rpm	0.004	5 rpm
3 rpm	0.010	8 rpm
4 rpm	0.018	10 rpm

The radius of lab scale= 0.15 m The radius of industrial scale= 1m

2. Preparation of Materials

Raw chicken breasts were collected from the chicken company and kept in refrigerator 0-1 days. Chicken breast was cut into 10-14 mm width, 50-70 mm length and 8-12 mm thickness and kept in the refrigerator at 0-4 °C.

3. Marination

For industrial scale (control sample), the vacuum tumbler (B-B10, Henneken Tumbler, Germany) was 1 m in radius, 4000 kg in capacity. Fillets were tagged and weighed before they were vacuum-tumbled for 50 minutes at 3 rpm and -0.7 bar in marinade solutions (25% of initial fillet weight) at 4°C. Marinade solution was prepared according to company specification.

For lab scale, the vacuum tumbler (MGH-20 STL, Vakona GmbH, Germany) was 0.15 m in radius, 10 kg in capacity. Fillets were tagged and weighed before they were vacuum-tumbled for 20, 35 and 50 minutes at 5, 8 and 10 rpm and -0.7 bar in marinade solutions (25% of initial fillet weight) at 4°C. Marinade solution was prepared according to company specification.

4. Cooking

Fillets were cooked using deep fat fryer at 190 °C for 33 seconds then steamed in hot air oven at 90 °C for 7 minutes at 95% moisture content of hot air oven and the last process is freezing in a spiral freezer at -40 °C for 40 minutes.

5. Absorption

The absorption percentage was determined by the equation following Xiong and Kupski (1999) in equation 2.

$$\%absorption = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 10 \qquad (2)$$

Where w_1 represents the weight before margination and w_2 represents the weight after margination.

6. Shear force measurement

Determinations of shear force for the sample after marination and after cooking were done. Samples were cut (1.0x3.0x0.5 cm^3) paralleled with the muscle fibre for shear analysis using a texture

analyzer (TA. XT Plus, Stable Micro System, UK) equipped with a Warner-Bratzler shear apparatus, speed of 2 mm/s, pre-speed of 2mm/s, post-speed of 10 mm/s, distance of 30 mm, and 50g force. Maximum force was read and report from an average (Wattanachant *et al*., 2004).

7. Colour measurement

Surface meat colour were measured using a Hunter Lab colorimeter (Miniscan XE, USA) in CIELAB system which L*, a*, and b* values represent the degrees of lightness, redness, and yellowness, respectively (Popat *et al*., 2016). The colour was measured at 3 positions (top, middle and bottom) and 4 pieces and report in average.

8. Salt concentration

Salt concentration (%) is determined by Mohr's method according on Nielsen (2010).

9. Data analysis

Statistical analyses were determined using SPSS version 17 (IBM, USA(. Control sample was industrial sample (sampling from marination process in the processing line). For comparison between marination method, the data were analysed by Independent samples T-Test. For determination of optimum condition, samples were analysed by one-way analysis of variance (ANOVA). Using Duncan's post hoc test and differences were considered to be at significant level of 0.05.

RESULTS AND DISCUSSION

1. **Comparison of absorption, salt concentration, colour value and shear force of cooked frozen chicken breast strips for scaling down method**

Scale down method of vacuum tumbling form industrial scale to lab scale that can be studied on small samples thus reducing cost for investigation of the new condition and have similar result when scale up.The result of scale down method, experiment samples compared with control samples (industrial samples) on absorption, salt concentration, colour value and shear force is summarized in Table 2. The result on absorption, salt concentration and shear force of industrial samples and experiment samples was not significantly different (p>0.05) because using the same marinade solution, time and the revolutions per minute (rpm) was different but same G number. The similar observation was also made by Gao *et al*., (2015), they used the same marinade solution and rotation speed so the result of absorption and force was not significantly different (p>0.05), Sanders (1969); U-Chupaj *et al*. (2017) reported that when rotating meat and massage inside the vacuum tumbler that was provided physical impact, the water penetration between the skin and the muscle was significantly increased. This indicates that tumbling can increase water absorption due to the mechanical force. The colour values of L* and b* were not significantly different (p>0.05) but a* was slightly different, possibly affected by factors such as age, exercise, the diet of the animal, as well as genetics and environment (Livingston and Brown, 1981). In summary, absorption, salt concentration, colour value (L* and b*) and shear force of scale down and industrial condition were not different. Thus, the vacuum tumbling process can be scaled down using the concept of G number.

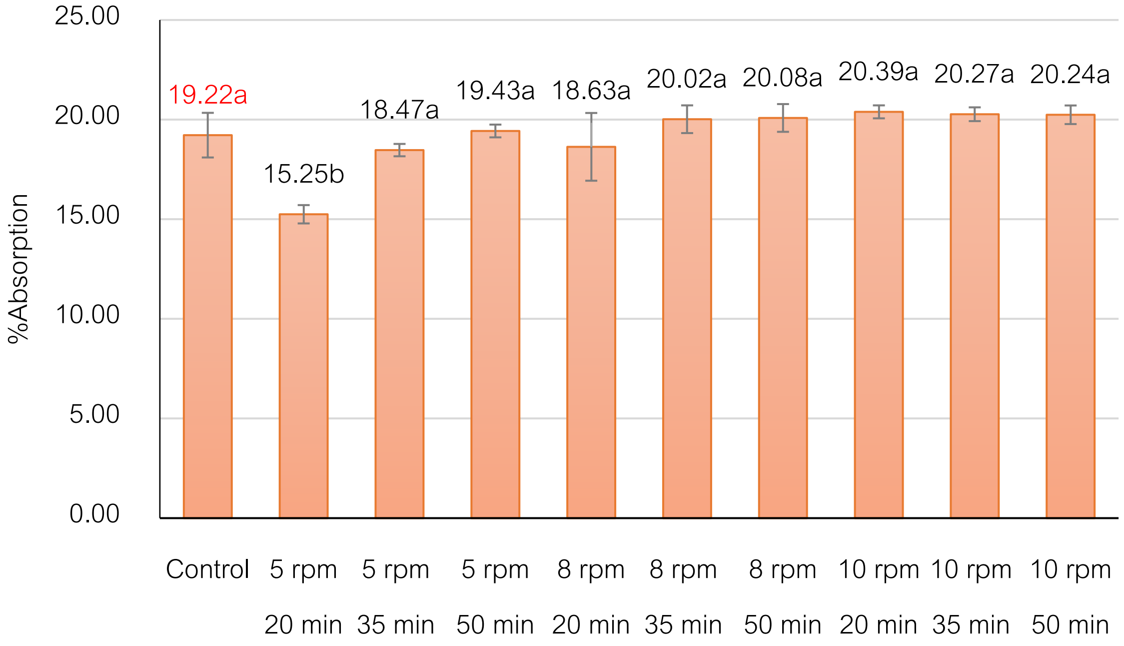
Table 2 Quality of industrial samples and experiment samples

	Industrial samples	Experiment samples
Absorption (%)	19.22±1.12[a]	19.01±1.34[a]
Salt concentration (%)	1.07±0.02[a]	1.09±0.02[a]
Colour value		
L*	58.55±0.29[a]	58.01±0.42[a]
a*	6.22±0.26[b]	7.08±0.20[a]
b*	17.54±0.50[a]	18.63±0.35[a]
Shear force (g)	1199.20±164.27[a]	1316.96±142.9[a]

[a-b]Means with different letters in the same column (within each main effect or interaction) are significantly different (p< .(0.05

2. **Determination of optimum condition from absorption, salt concentration, colour value and shear force of cooked frozen chicken breast strips**

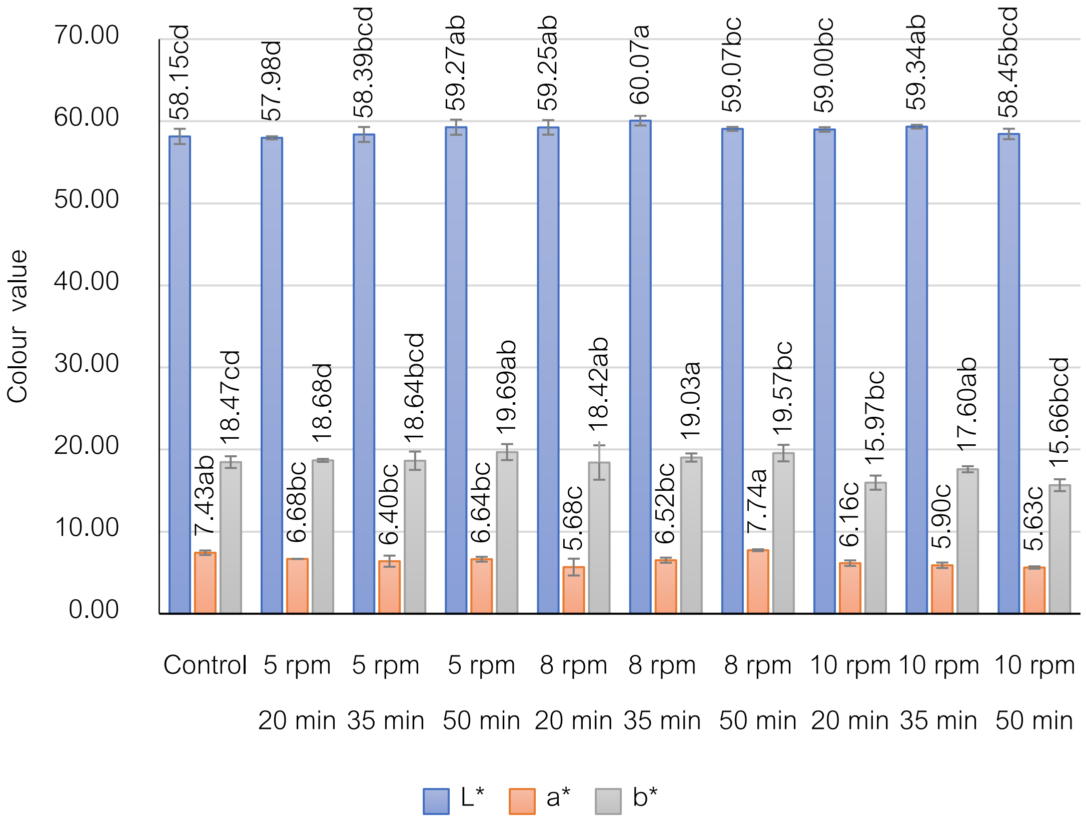
The comparison of control samples (industrial sample, 3 rpm 50 minutes) and 9 samples with 3 rotation speed of vacuum tumbler and 3 marination time (5 rpm at 20, 35 and 50 minutes; 8 rpm at 20, 35 and 50 minutes; 10 rpm at 20, 35 and 50 minutes) on absorption were studied. Figure 1 shows absorption was affected by rotation speed and marination time. In 6 conditions (5 rpm 50 minutes, 8 rpm at 35 and 50 minutes, 10 rpm at 20, 35 and 50 minutes), absorption was increased because increasing marination time and rotation speed that improve mechanical force; therefore, absorption increased. From report of Popat *et al*. (2016), the physical impact on chicken meat increased extraction of salt soluble protein to the surface of meat and increased water holding capacity.



[a-b]Means with different letters in the same column (within each main effect or interaction) are significantly different (*p*< (0.05

Figure 1 Absorption of marinate solutions at rotation speed of 5, 8 and 10 rpm and marination time of 20, 35 and 50 minutes.

The comparison of control samples (industrial sample, 3 rpm 50 minutes) and 9 samples with 3 rotation speed of vacuum tumbler and 3 marination time (5 rpm at 20, 35 and 50 minutes; 8 rpm at 20, 35 and 50 minutes; 10 rpm at 20, 35 and 50 minutes) on colour value is shown in Figure 2. The colour was significantly different (p<0.05) between control and 6 conditions (5 rpm 50 minutes, 8 rpm at 35 and 50 minutes, 10 rpm at 20, 35 and 50 minutes), that showed more lightness (L*), redness (a*) and less yellowness (b*). However, the colour of chicken meat after marination was slightly different. Kropf (1993) reviewed that absorbing properties was one of the factors that could affect to meat colour. Therefore, the 6 conditions of colour was related to absorption thus increasing absorption, increasing lightness (L*) and redness (a*) and decreasing yellowness (b*).



[a-d]Means with different letters in the same column (within each main effect or interaction) are significantly different (p<(0.05

Figure 2 Colour value of sample at rotation speed of 5, 8 and 10 rpm and marination time of 20, 35 and 50 minutes.

The comparison of control samples (industrial sample, 3 rpm 50 minutes) and 9 samples with 3 rotation speed of vacuum tumbler and 3 marination time (5 rpm at 20, 35 and 50 minutes; 8 rpm at 20, 35 and 50 minutes; 10 rpm at 20, 35 and 50 minutes) on shear force and salt concentration is shown in Table 3. The salt concentration of control and sample after marination was not significantly different (p>0.05) possibly it in equilibrium state of salt. Alvarado and McKee (2007) reviewed that the process of osmosis, the brine solution will be absorbed by the meat until a state of equilibrium is reached. The shear force between control and after marination was not significantly different (p>0.05) but shear force

after cooking of sample condition 5 rpm at 20 35 and 50 minutes was significantly different ($p<0.05$) from control condition. The results indicated that the process of marination improved the meat quality by decreasing shear force while enhancing the meat tenderness. Shear force related to absorption of marinade solution into the muscle of chicken meat, leading to an increase in water content (Komoltri and Pakdeechanuan, 2012), causing of more tenderness. However, in term of G number, the mechanical force that impact to chicken meat that loosen the muscle structures, destroying the connections between myofibrils and collagen (Cassidy *et al*., 1978; Hayes *et al*., 2006), thus lower G force show higher shear force and lower tenderness. For the best condition was 8 rpm 35 minutes due to absorption more than control sample. The time reduction of 15 minutes of marination time and texture was not different from control. This implies that the company can save marination time for 15 minutes or can increase the production capacity.

Table 3 Effect of marination time and rotation speed on shear force and salt concentration .

Treatment	Salt concentration (%)	Shear force (Marinade)	Shear force (Cooking)	G number
Control (3rpm, 50min)	1.30±0.05^{ab}	1316.96±247.51^{a}	1539.12±372.49^{c}	0.010
5 rpm 20 min	1.27±0.04^{b}	1346.13±234.04^{a}	2933.19±436.62^{a}	0.004
5 rpm 35 min	1.29±0.02^{b}	1478.02±437.81^{a}	1959.41±344.35^{b}	
5 rpm 50 min	1.30±0.06^{ab}	1594.99±324.68^{a}	1924.85±601.26^{b}	
8 rpm 20 min	1.30±0.04^{ab}	1601.77±232.616^{a}	1497.83±272.08^{c}	0.010
8 rpm 35 min	1.35±0.03^{a}	1573.43±273.72^{a}	1507.58±240.31^{c}	
8 rpm 50 min	1.34±0.02^{a}	1630.52±293.28^{a}	1549.51±224.10^{c}	
10 rpm 20 min	1.28±0.06^{b}	1611.81±289.58^{a}	1519.39±304.99^{c}	0.018
10 rpm 35 min	1.25±0.05^{b}	1618.40±225.07^{a}	1416.35±221.61^{c}	
10 rpm 50 min	1.28±0.02^{b}	1337.99±300.49^{a}	1567.26±238.12^{c}	

$^{a-c}$Means with different letters in the same column (within each main effect or interaction) are significantly different (*p*<(0.05

CONCLUSION

Scale down method can reduce tumbling scale from industrial to lab scale. The benefit of scale down method was reducing cost and has the same result when scale up. Scale down method by using G number concept is applicable. The qualities of samples were not different between industrial samples and experiment samples. Control condition or Industrial scale (3 rpm 50 minutes) gave similar results to in lab scale condition (8 rpm 50 minutes). The best condition for the lab scale tumbling was 8 rpm 35 minutes or the industrial scale tumbling was 3 rpm 35 minutes, the scale up condition that calculated from Table 1, that can reduce 15 minutes of marination time, increased absorption of marinate solutions and texture was not different.

REFERENCES

Alvarado, C. and S. McKee. 2007. Marination to improve functional properties and safety of poultry meat. **The Journal of Applied Poultry Research**. 16(1): 113–120.

Cassidy, R., H. Ockerman, B. Krol, P. Roon, R. Plimpton and V. Cahill. 1978. Effect of tumbling method, phosphate level and final cook temperature on histological characteristics of tumbled porcine muscle tissue. **Journal of Food Science**. 43(5): 1514-1518.

Gamage, H.G.C.L., R.K. Mutucumarana and M.S. Andrew. 2017. Effect of marination method and holding time on physicochemical and sensory characteristics of broiler meat. **The Journal of Agricultural Sciences**. 12 (3): 172-184.

Gao, T., J. Li, L. Zhang, Y. Jiang, R. Ma, L. Song, F. Gao and G. Zhou. 2015. Effect of different tumbling marination treatments on the quality characteristics of prepared pork chops. **Journal of Animal Science.** 28 (2): 260-267.

Hayes, J.E., E.M. Desmond, D.J. Troy, D.J. Buckley and R. Mehra. 2006. The effect of enhancement with salt, phosphate and milk proteins on the physical and sensory properties of pork loin. **Meat Science.** 72(3): 380-386.

Komoltri, P. and P. Pakdeechanuan. 2012. Effects of marinating ingredients on physicochemical, microstructural and sensory properties of golek chicken. **International Food Research Journal**. 19(4): 1449–1455.

Kropf, D.H. 1993. Colour stability: Factors affecting the colour of fresh meat. **Meat Focus International**. 1: 269–275.

Livingston, D.J. and W.D. brown. 1981. The chemistry of myoglobin and its reactions. **Food Technology**. 35: 244–252.

Popat, D.S., G.R. Manohar, N. Ramamurthy and R. Narendrababu. 2016. Effect of vacuum tumbling on cooking yield and physical property of tandoori prepared from broiler meat. **International Journal of Science.** 5(5):3603-3609.

U-Chupaj, J., Y. Malila, M. Petracci, S. Benjakul and W. Visessanguan. 2017. Effect of tumbling marination on marinade uptake of chicken carcass and parts quality. **Revista Brasileira de Ciencia Avicola.** 19(1): 61–68.

Wattanachant, S., S. Benjakul and D. Ledward. 2004. Composition, color, and texture of thai indigenous and broiler chicken muscles. **Poultry Science.** 83: 123-128.

Xiong, Y.L. and D.R. Kupski. 1999. Monitoring phosphate marinade penetration in tumbled chicken filets using a thin-slicing, dye-tracing method. **Poultry Science.** 78 (7): 1048-1052.

อิทธิพลของลำดับการย้อมที่มีต่อการย้อมสีย้อมธรรมชาติจากเปลือกมะพูดและครามบนผ้าไหม

Effect of Dyeing Sequence in Dyeing of Natural Dyes from *Garcinia Dulcis* Bark and Indigo on Silk Fabric

นภาวรรณ มาตรเจริญ[1] และ ขนิษฐา วัชราภรณ์[1*]

Napawan Martjarern[1] and Kanitta Watcharaporn[1*]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการย้อมผ้าไหมของสีผสมจากเปลือกมะพูดและคราม โดยศึกษาความแตกต่างของลำดับการย้อมต่อความเข้มสีและความคงทนของสีต่อการซัก และการพัฒนาเฉดสีจากการย้อมสีธรรมชาติด้วยเปลือกมะพูดและคราม ทำการวัดค่าสีในระบบ CIELAB ในการเปรียบเทียบผ้าไหมที่ใช้ย้อม โดยใช้ค่า L* a* b* และ K/S ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ผลการศึกษา พบว่าอิทธิพลของลำดับการย้อมที่แตกต่างกันให้ผลการย้อมที่ได้แตกต่างกัน การย้อมครามก่อนแล้วย้อมเปลือกมะพูดทับให้ค่าความเข้มสี (K/S) สูงกว่าการย้อมเปลือกมะพูดก่อนแล้วย้อมครามทับ แต่เมื่อพิจารณาจากค่าความคงทนของสีต่อการซัก พบว่าผ้าไหมที่ย้อมด้วยเปลือกมะพูด-คราม มีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับดี (4) ซึ่งมีความคงทนของสีสูงกว่าผ้าไหมย้อมด้วยคราม-เปลือกมะพูดที่มีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับปานกลาง (3) ดังนั้นการย้อมเปลือกมะพูดก่อนแล้วย้อมครามทับ จึงเป็นลำดับการย้อมที่เหมาะสม นอกจากนี้การพัฒนาเฉดสีจากการย้อมเปลือกมะพูดและคราม โดยการเพิ่มจำนวนครั้งในการย้อมครามทับ มีผลให้ได้เฉดสีที่หลากหลายเพิ่มขึ้น

ABSTRACT

The objectives of this research were to study dyeing of compound shades of natural dyes from *Garcinia Dulcis* bark and Indigo on silk fabric. To study the differences of color strength and color fastness to washing that were affected from dyeing sequence, as well as the development of color shades of dyeing from natural dyes. The color strength values (K/S) and CIELAB color parameters (L*, a*, b*) were evaluated using Spectrophotometer. This study founded that the effect of dyeing sequences resulted in different dyeing. The dyeing sequence of Indigo - *Garcinia Dulcis* bark gave the color strength values (K/S) higher than the dyeing sequence of *Garcinia Dulcis* bark - Indigo. But when consider from the color fastness to washing, silk dyed with *Garcinia Dulcis* bark – Indigo showed good levels (4). It showed higher fastness than the Indigo - *Garcinia Dulcis* bark dyed silk which it showed fair levels (3). So, the dyeing sequence of *Garcinia Dulcis* bark – Indigo is suitable dyeing methods. In addition, the color shades of dyeing from *Garcinia Dulcis* bark and Indigo were developed by increasing the number of top dyeing with indigo. This results showed increasing variety of dyeing shades.

Key words: natural dye, silk, dyeing sequence, *Garcinia Dulcis* Bark, Indigo

* Corresponding author; e-mail address: Kanitta.a@ku.th

[1]ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ผ้าไหมไทยเป็นหัตถกรรมพื้นบ้านที่มีการสืบทอดกันมาอย่างยาวนาน ในแต่ละท้องถิ่นจะมีเอกลักษณ์แตกต่างกันไปตาม สภาพภูมิศาสตร์ วัฒนธรรม และขนบธรรมเนียมประเพณีตลอดจนการผสมผสานค่านิยมในสังคมที่สืบทอดกันมา ปัจจุบันสีย้อมธรรมชาติได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการตระหนักถึงสิ่งแวดล้อมและผลกระทบที่เป็นอันตรายของผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพ Choudhury (2018)

ส่วนใหญ่สีธรรมชาติได้มาจากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ราก แก่น เปลือก ต้น ผล ดอก เมล็ด ใบ (ภัทรา นิฎชณ์, 2558) ถึงแม้ว่าสีธรรมชาติจะมีข้อดีแต่ก็ยังมีข้อจำกัดในด้านเฉดสี โดยมีสีให้เลือกไม่มากนัก งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจการเลือกใช้สีผสมของสีน้ำเงินและสีเหลือง จากรายงานวิจัยสีธรรมชาติพบว่า กลุ่มให้สีน้ำเงินได้จาก คราม ฮ่อม และกลุ่มให้สีเหลืองได้จาก หัวขมิ้นชัน เปลือกมะพูด แก่นขนุน (สุวิมล, 2557)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาเฉดสีผสมของสีย้อมธรรมชาติระหว่างสีน้ำเงินกับสีเหลือง โดยการเลือกใช้สีน้ำเงินจากครามเพราะเป็นพืชท้องถิ่นที่พบมากทางภาคอีสาน (ไพศาล และคณะ, 2543) และการเลือกใช้สีเหลืองจากมะพูดเพราะให้สีเหลืองสดใสมากกว่าพืชชนิดอื่น (ธนิยา, 2555) โดยการศึกษาอิทธิพลของลำดับการย้อมของสีผสมจากเปลือกมะพูดและครามส่งผลต่อผลของการย้อมอย่างไร เพื่อพัฒนาวิธีการย้อมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการย้อมผ้าไหมจากเปลือกมะพูดและคราม ซึ่งผลการศึกษานี้จะนำไปสู่การพัฒนาเฉดสีที่หลากหลายในการย้อมสีผ้าไหมจากสีย้อมธรรมชาติ

อุปกรณ์และวิธีการ

การสกัดสีจากเปลือกมะพูดและคราม

1. เปลือกมะพูด

การสกัดสีจากเปลือกมะพูด ใช้เปลือกมะพูดสับในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเปลือกมะพูดต่อน้ำเท่ากับ 1:5 ต้มจนเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองเปลือกมะพูดออกด้วยผ้าขาวบาง แล้วนำน้ำสกัดที่ได้ไปใช้ในการทดลองต่อไป

2. คราม

การเตรียมน้ำครามสำหรับการย้อม ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของครามเปียก : น้ำมะขาม : น้ำด่างขี้เถ้าเข้มข้นเท่ากับ 1:1:1 โดยผสมครามและน้ำมะขามให้เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นเติมน้ำด่างลงไป ทิ้งไว้ประมาณ 4-5 ชั่วโมง สังเกตน้ำในหม้อครามเปลี่ยนเป็นสีเหลือง จึงสามารถนำมาใช้ย้อมผ้าไหมได้ (สุชาดา และคณะ, 2557)

กระบวนการย้อมสีผ้าไหมจากเปลือกมะพูดและคราม

1. เปลือกมะพูด

การย้อมใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผ้าไหม (55.44 g/m^2, ผ้าทอลายขัด) ต่อน้ำย้อมเท่ากับ 1:50 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยเติมสารส้ม (aluminum potassium sulfate) 2 g/l ลงไปพร้อมน้ำย้อม เมื่อครบกำหนดให้ล้างทำความสะอาดแล้วนำไปตากให้แห้ง

2. คราม

การย้อมใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผ้าไหม (55.44 g/m^2, ผ้าทอลายขัด) ต่อน้ำย้อมเท่ากับ 1:50 ที่อุณหภูมิ 30 ± 5 องศาเซลเซียส โดยนำผ้าไหมลงไปย้อมในหม้อคราม บีบให้น้ำซึมทั่วถึง เป็นระยะเวลา 5 นาที บิดผ้าไหมให้หมาด ตากทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที ย้อมซ้ำ 1 ครั้ง แล้วล้างน้ำจนน้ำล้างไม่มีสี แล้วจึงนำไปตากให้แห้ง

การเปรียบเทียบลำดับการย้อมเปลือกมะพูด - คราม และ ลำดับการย้อมคราม - เปลือกมะพูด

ศึกษาผลของลำดับการย้อมจากเปลือกมะพูดและคราม โดยการเปรียบเทียบผลการย้อมระหว่าง การย้อมเปลือกมะพูดก่อนแล้วย้อมครามทับ และการย้อมครามก่อนแล้วย้อมเปลือกมะพูดทับ พิจารณาเลือกวิธีการย้อมที่เหมาะสมจากผลการย้อมโดยพิจารณาจากค่าความเข้มสี (K/S) และความคงทนของสีต่อการซัก

การทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

ศึกษาค่าความคงทนของสีต่อการซัก เปรียบเทียบค่าความคงทนของสีต่อการซักของผ้าไหมย้อมสีด้วยเปลือกมะพูดก่อนแล้วย้อมครามทับ และผ้าไหมย้อมสีด้วยครามก่อนแล้วย้อมเปลือกมะพูดทับ ตามมาตรฐาน AATCC Test Method 61-2010 โดยใช้เกรย์สเกลสำหรับประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงสีและการเปื้อนติดสีและใช้เครื่อง Spectrophotometer (Datacolor 550) ในการวัดค่าสี (dL*, da*, db*, dE*) ของผ้าไหมย้อมสีก่อนและหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก (ศิริกุล, 2552)

การพัฒนาเฉดสีจากการเลือกลำดับการย้อมที่เหมาะสม

จากผลการศึกษา พบว่า ลำดับการย้อมที่เหมาะสมคือ การย้อมเปลือกมะพูดก่อนแล้วย้อมครามทับ ศึกษาการพัฒนาเฉดสีจากการเลือกลำดับการย้อมที่เหมาะสม โดยการย้อมเปลือกมะพูดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เติมสารส้ม (aluminum potassium sulfate) 2 g/l ลงไปพร้อมน้ำย้อม หลังจากนั้นนำไปย้อมครามทับ ซึ่งมีการเพิ่มจำนวนการย้อมครามทับจากครั้งที่ 1- 6 เพื่อศึกษาผลของการย้อมต่อเฉดสีที่ได้

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเปรียบเทียบลำดับการย้อมเปลือกมะพูด - คราม และ ลำดับการย้อมคราม - เปลือกมะพูด

ผลการย้อมผ้าไหมด้วยสีธรรมชาติจากเปลือกมะพูดและครามโดยใช้ลำดับการย้อมที่แตกต่างกัน ใน TAble 2 แสดงค่าสีที่วัดได้ โดยเครื่อง Spectrophotometer รุ่น Datacolor 550 เมื่อพิจารณาจากค่า L* a* b* และ K/S พบว่าอิทธิพลของลำดับการย้อมที่แตกต่างกันให้ผลการย้อมแตกต่างกัน โดยผ้าไหมที่ย้อมด้วยเปลือกมะพูด - ครามให้ผลการย้อมเป็นสีเขียวเข้มกว่า โดยมีค่า a* เท่ากับ -16.10 ส่วนผ้าไหมที่ย้อมด้วยคราม-เปลือกมะพูดมีค่า a* เท่ากับ-15.03 ในส่วนความเข้มสี (K/S) พบว่าผ้าไหมที่ย้อมด้วยคราม-เปลือกมะพูด มีค่าความเข้มสี (K/S) สูงกว่าผ้าไหมที่ย้อมด้วยเปลือกมะพูด-คราม อย่างไรก็ตามการเลือกลำดับการย้อมที่เหมาะสมต้องพิจารณาคุณสมบัติความคงทนของสีต่อการซักร่วมด้วย

Table 1 CIE L* a* b* values of dyed silk fabric by *Garcinia Dulcis* bark and Indigo.

Dyes	K/S	L*	a*	b*	color obtained
Garcinia Dulcis bark	15.95	76.69	1.10	65.86	
Indigo	1.07	47.39	-3.75	-20.11	

Table 2 CIE L* a* b* values of dyed silk fabric at different of dyeing sequence.

Note: Color appearances from Spectrophotometer: Datacolor 550.

Dyeing sequence	K/S	L*	a*	b*	color obtained
Garcinia Dulcis bark - Indigo	11.31	45.98	-16.10	29.44	
Indigo - *Garcinia Dulcis* bark	15.52	49.01	-15.03	33.67	

การทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

Table 3 แสดงค่าความคงทนของสีต่อการซัก เห็นได้ว่าลำดับการย้อมมีผลต่อความคงทนของสี เมื่อพิจารณาจากค่าการเปลี่ยนแปลงของสี พบว่าผ้าไหมที่ย้อมด้วยเปลือกมะพูด-คราม มีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับดี (4) ส่วนผ้าไหมที่ย้อมด้วยคราม-เปลือกมะพูด มีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับปานกลาง (3) ส่วนค่าการเปื้อนติดสี พบว่าการย้อมด้วยเปลือกมะพูด - คราม และการย้อมด้วยคราม-เปลือกมะพูดทับมีค่าการเปื้อนติดสีอยู่ในระดับ 4-5 กล่าวคือผ้าไหมมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับดีถึงดีมาก ยกเว้นเส้นใยไนลอนที่มีค่าการเปื้อนติดสีของผ้าทดสอบอยู่ในระดับ 3-4 ซึ่งมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับปานกลางถึงดี นอกจากนี้ผลการเปลี่ยนแปลงสีของผ้าไหมหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก ในตารางที่ 4 ผ้าไหมย้อมด้วยคราม - เปลือกมะพูดมีค่าความแตกต่างของสี (dE*) เท่ากับ 2.01 ต่ำกว่าผ้าไหมย้อมด้วยเปลือกมะพูด - คราม ที่มีค่าความแตกต่างของสี (dE*) เท่ากับ 4.18 สรุปได้ว่าการย้อมผ้าไหมด้วยเปลือกมะพูดก่อน-ครามมีความคงทนของสีต่อการซักสูงกว่าการย้อมผ้าไหมด้วยคราม-เปลือกมะพูด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสีที่ตกส่วนใหญ่น่าจะมาจากสีของมะพูด เนื่องจากครามเป็นพิกเม้นต์อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ

Table 3 Color fastness to washing at 40 °C (AATCC Test Method 61-2010) of dyed silk fabric at different of dyeing sequence.

Fastness	Dyeing sequence	
	Garcinia Dulcis bark - Indigo	Indigo - *Garcinia Dulcis* bark
Color change	4	3
Color staining		
Acetate	4	4-5
Cotton	4-5	4-5
Nylon	3-4	3-4
Silk	5	5
Viscose	5	5
Wool	4-5	4-5

Table 4 dL*, da*, db*, dE* values of dyed silk fabric after the washing test by using different of dyeing sequence

Dyeing sequence	dL*	da*	db*	dE*
Garcinia Dulcis bark - Indigo	1.22	0.05	1.28	2.01
Indigo - *Garcinia Dulcis* bark	- 0.59	3.11	5.80	4.18

ผลของการพัฒนาการเพิ่มเฉดสีที่ได้จากการเลือกลำดับการย้อม

Table 5 CIE L* a* b* values of dyed silk fabric with compound shades of *Garcinia Dulcis* bark topped with Indigo by repeat 6 time of dyeing

Garcinia Dulcis bark)Alum(	Indigo) Time(	K/S	L*	a*	b*	color obtained
2 %	1	9.91	53.84	-16.16	45.35	
2 %	2	11.31	45.98	-16.10	29.44	
2 %	3	11.61	42.03	-16.27	23.96	
2 %	4	11.96	38.09	-14.37	17.33	
2 %	5	13.02	35.78	-12.73	12.42	
2 %	6	15.07	33.65	-11.43	9.20	

Note: Color appearances from Spectrophotometer: Datacolor 550.

จากตารางที่ 5 แสดงค่าความเข้มสี (K/S) ที่ได้จากการย้อมผ้าไหมด้วยเปลือกมะพูดก่อนแล้วย้อมครามทับ โดยการเพิ่มจำนวนครั้งในการย้อมครามทับ จากการศึกษา พบว่าค่าความเข้มสี (K/S) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม

จำนวนครั้งในการย้อมครามทับ การย้อมครามทับครั้งที่ 6 ให้ค่าความเข้มสี (K/S) มากที่สุด เนื่องจากเส้นไหมมีอัตราการดูดซับสีย้อมในปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม (ไพศาล และคณะ, 2543; Teli and radnya, 2017)

สรุป

การย้อมเปลือกมะพูดก่อนแล้วย้อมครามทับ เป็นลำดับการย้อมที่เหมาะสมจากการเปรียบเทียบผลของวิธีการย้อมผ้าไหมด้วยสีธรรมชาติจากเปลือกมะพูดและคราม โดยมีความคงทนของสีต่อการซักดีกว่าการย้อมครามก่อนแล้วย้อมเปลือกมะพูดทับ นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาการเพิ่มเฉดสีให้มีความหลากหลายเพิ่มขึ้นได้จากการย้อมเปลือกมะพูดและคราม โดยการเพิ่มจำนวนครั้งในการย้อมครามทับบนผ้าไหม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณอาภาพร บุญภา และคุณสุดสงวน อ้อทอง เจ้าหน้าที่กรมหม่อนไหม จังหวัดชัยภูมิ ที่ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินการวิจัย และสนับสนุนในการจัดหาวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จารุวรรณ ดิศวัฒน์. 2546. **การย้อมผ้าไหมด้วยสีจากขมิ้นชันแห้ง.** คหกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนิยา ชูศิลป์. 2555. **การเพิ่มการดูดซับสีย้อมธรรมชาติจากเปลือกมะพูด** *Garcinia dulcis* (Roxb.) Kurz **ของเส้นใยกัญชงโดยใช้ไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุลต่ำ.** วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพศาล คงคาฉุยฉาย และคณะ. 2543. **การพัฒนาเทคนิคการย้อมไหม ด้วยสีธรรมชาติจากครามและครั่ง.** กรุงเทพฯ: รายงานวิจัยภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 26-28.

ภัทรานิฎชณ์ พิมพ์ประพร. 2558. **การศึกษาอิทธิพลของสารช่วยติดสีต่อเฉดสีของสีย้อมธรรมชาติสกัดจากใบหมี่ บนเส้นใยไหมย้อมด้วยกระบวนการย้อมแบบดูดซึม.** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ศันสนีย์ แวนประเสริฐ. 2552. **สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย้อมผ้าไหมด้วยครามธรรมชาติ.** คหกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริกุล อัมพะวะสิริ. 2552. **การย้อมไหมเป็นสีขั้นที่ 2 ด้วยสีธรรมชาติ.** คหกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุชาดา อุชชิน และคณะ. 2557. **สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย้อมไหมด้วยสีแวตธรรมชาติ: สีคราม.** 74.

สุวิมล หงษ์สาม. 2557. **ศึกษาและพัฒนากระบวนการเพิ่มจำนวนเฉดสีย้อมธรรมชาติบนด้ายฝ้าย ด้วยห้อม เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์สิ่งทอ.** ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อนุรัตน์ สายทอง. 2555. ไหมย้อมครามธรรมชาติ. KKU Science Journal 40(2): 423-435.

Asim Kumar Roy Choudhury. 2018. Eco-friendly dyes and dyeing. **Advanced Materials and Technologies for Environmental Applications** 2: 145-176.

Rattanaphol Mongkholrattansit *et al*. 2014. Natural Dye from Garcinia dulcis (Roxb.) Kurz Bark and Application on Silk Fabric by Using Pad-Batch Dyeing: A Study on Mordant Concentrations Efficiency. **Advanced Materials Research** 884-885: 216-219.

Teli and Pradnya Ambre. 2017. Development of Compound Shades of Indigo and Marigold using Natural Mordants on Cotton and Cotton/Viscose Blend. **Journal of TEXTILE Association**:15-20.

Yuyang Zhou and Ren-Cheng Tang. 2016. Modification of curcumin with a reactive UV absorber and its dyeing and functional properties for silk. **Dyes and Pigments** 134: 203-211.

การศึกษาและพัฒนากระบวนการย้อมสีกกทอเสื่อด้วยสีธรรมชาติจากครั่ง

Study and Development Process for Reed Dyeing with Natural Dyes Using *Laccifer lacca* Keer

เกศศิณี นามกร[1] พรเพ็ญ อาธรกิจวัฒน์[2] และ ขนิษฐา วัชราภรณ์[1*]

Katsinee Nammakorn[1], Pornpen Atorngitjawat[2] and Kanitta Watcharaporn[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของการย้อมเส้นกกด้วยสีย้อมธรรมชาติสกัดจากครั่ง โดยศึกษาปัจจัยในการย้อมได้แก่ วิธีการย้อม ชนิดและความเข้มข้นของสารช่วยติดหรือมอร์แดนท์ ที่ส่งผลต่อเฉดสี (CIE L*a*b*) ความเข้มสี (K/S) และความคงทนของสีในเส้นกก จากผลการศึกษาพบว่าชนิดของสารช่วยติดมีผลต่อเฉดสี เมื่อใช้โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต (AlK(SO4)2) เป็นสารช่วยติด เส้นกกย้อมด้วยสีจากครั่งจะมีเฉดสีแดง เส้นกกมีค่าความเข้มสีมากที่สุดเมื่อใช้ โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟตพร้อมการย้อม และความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดคือ 2 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เป็นสารช่วยติด เส้นกกย้อมด้วยสีจากครั่งจะมีเฉดสีดำ เมื่อความเข้มข้นของเฟอรัสซัลเฟตเพิ่มขึ้นสีของเส้นกกจะมีความเข้มเพิ่มขึ้น และมีค่าความเข้มสีมากที่สุดเมื่อใช้เฟอรัสซัลเฟตเป็นสารช่วยติดก่อนการย้อมที่ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารช่วยติดในการย้อมเส้นกกด้วยครั่งจะช่วยเพิ่มความคงทนของสีต่อแสงแต่ไม่มีผลต่อคงทนของสีต่อการขัดถู

ABSTRACT

The study on effect of dyed reed with natural dyes extracted from Laccifer lacca Keer was conducted on dyeing factors, including dyeing method, type and concentration of mordant. Those factors affected the shades (CIE L*a*b*), color strength (K/S) and color fastness of reed dyed. The results showed that the mordant had an effect on the shades of dyed reed with Laccifer lacca Keer. When the aluminum potassium sulfate (AlK(SO4)2) was used as mordant, those reed turned into red color. The reed dyed had the highest color strength when using meta-mordant method with potassium aluminum sulphate as a mordant, with optimum mordant concentration at 2 g/l. When the ferrous sulfate ($FeSO_4$) was used as mordant, reed turned toward black color. When the concentration of ferrous sulphate increased, the dyed reed showed higher color strength. the highest color strength was obtained when reed was dyed with the pre-mordant method, using 4 g/l of ferrous sulfate as mordant. Moreover, it was found that mordanting lac dyed reed resulted in increasing of colorfastness to light but it was no effect to colorfastness to rubbing.

Key words: Reed, Natural dyes, lac dye, mordant dyeing, Test

* Corresponding author; e-mail address: kanitta.a@ku.th

[1]ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

[2]Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 20131

คำนำ

การทอเสื่อกกในจังหวัดจันทบุรีมีมาตั้งแต่สมัยอยุธยาตอนปลายและยังมีการสืบทอดกันมาจนถึงปัจจุบัน ต้นกกเป็นพืชที่ขึ้นเองตามธรรมชาติพบได้ทั่วไปตามพื้นที่ที่มีน้ำขังชื้นแฉะ ซึ่งกกจะเจริญเติบโตได้รวดเร็ว ในอดีตชาวบ้านส่วนใหญ่มีอาชีพทำสวนทำไร่เมื่อว่างจากการทำการเกษตรจึงนำกกมาทอเป็นเสื่อเพื่อใช้เองภายในบ้าน (อารีย์, 2553; ศรนารายณ์, 2553) ต่อมามีการปลูกต้นกกเพื่อเอามาทำการทอขายเป็นอาชีพเสริมสร้างรายเลี้ยงดูครอบครัว จนในช่วงหนึ่งเสื่อกกจากจังหวัดจันทบุรีได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากการสนับสนุนและการส่งเสริมของสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี พระอัครมเหสีในพระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัว (รัชกาลที่ 7) หลังจากมาประทับที่วังสวนบ้านแก้วเมื่อปี พ.ศ. 2493 (สำนักงานวัฒนธรรมจังหวัดจันทบุรี, 2561) แต่ในปัจจุบันเสื่อกกได้รับความนิยมน้อยลงจำหน่ายไม่ได้ราคาสูงเท่าที่ควร ซึ่งการทอเสื่อเป็นงานหัตถกรรมที่มีความละเอียด และมีหลายขั้นตอนต้องใช้ความตั้งใจและความชำนาญสูง การรักษาไว้ซึ่งภูมิปัญญาเหล่านี้มีความจำเป็นเร่งด่วน จึงควรมีการพัฒนาให้ตอบรับกับความต้องการของผู้ซื้อและเป็นไปตามกระแสสังคมในปัจจุบัน

ปัญหาสภาพแวดล้อมที่มีให้เห็นในขณะนี้ทำให้ผู้คนเกิดความตระหนักเรื่องสิ่งแวดล้อมมากขึ้น การจะนำผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากวัสดุธรรมชาติเช่นเสื่อกกให้กลับมาได้รับความนิยมในตลาดผู้บริโภคน่าจะมีความเป็นไปได้สูง หากมีการนำสีธรรมชาติมาพัฒนาใช้ย้อมเส้นกกเหมือนอย่างผลิตภัณฑ์สิ่งทอประเภทอื่นก็จะเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้สินค้าเสื่อกกมีราคาสูงขึ้น และสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรต่อไป สีที่ถือเป็นเอกลักษณ์ของเสื่อกกจากจังหวัดจันทบุรีคือสีแดงและสีดำจะพบว่าลวดลายเก่าแก่ของเสื่อจังหวัดจันทบุรีมักมีสองสีนี้เป็นส่วนประกอบ (จุฑาทิพย์, 2548) ซึ่งสีธรรมชาติสีแดงที่มักนำมาย้อมสิ่งทอนั้นคือสีจากครั่ง เป็นสีธรรมชาติที่ได้จากสัตว์ประเภทแมลง ตัวครั่งจะทำรังบนต้นไม้ ภายในรังมีส่วนที่เรียกว่าเลือดครั่งหรือสีครั่ง (lac dye) เป็นสารสีแดง (ศรนารายณ์, 2553) เมื่อนำมาสกัดจะสามารถย้อมผ้าฝ้ายได้ ซึ่งฝ้ายเป็นเส้นใยเซลลูโลส (cellulose) เหมือนกับเส้นกก และพบว่าสารช่วยติด (mordant) เช่น เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ทำให้สีครั่งเปลี่ยนเป็นเฉดสีดำขึ้นได้ (Teli *et al.*, 2014; Montra *et al.*, 2008) ซึ่งสีธรรมชาติมักมีความคงทนของสีต่ำหรือหลุดออกจากวัสดุสิ่งทอได้ง่าย สารช่วยติดจะทำปฏิกิริยากับสีธรรมชาติ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ผนึกสีกับเส้นใยได้ดีขึ้น และอาจทำให้เฉดสีเดิมของสีธรรมชาติเปลี่ยนไปด้วย

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกศึกษาผลของการย้อมเส้นกกด้วยสีย้อมธรรมชาติจากครั่ง ด้วยสารช่วยติดสี (mordant) ที่แตกต่างกัน วิธีการย้อม และความเข้มข้นของสารช่วยติดสี โดยผลของการย้อมที่ได้นำมาทำการทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถูและความคงทนต่อแสง ซึ่งจากการศึกษานี้อาจทำให้เกิดการนำไปใช้ย้อมและต่อยอดผลิตภัณฑ์เสื่อกก หรือเป็นแนวทางนำไปสู่การศึกษาการย้อมเสื่อกกด้วยสีธรรมชาติสีอื่นๆ ที่หลากหลายต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การสกัดสารให้สีธรรมชาติจากครั่ง

สกัดสีย้อมธรรมชาติจากครั่งโดยการบดครั่งให้ละเอียดแล้วแช่ด้วยน้ำปราศจากอิออนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของครั่งต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 10 (ครั่ง 10 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร) ต้มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (นนทลี, 2543)

การศึกษาผลของสารมอร์แดนท์และวิธีการย้อมที่เหมาะสมในการย้อมเส้นกกด้วยสีย้อมธรรมชาติจากครั่ง

เปรียบเทียบผลของการย้อมเส้นกกด้วยสีย้อมธรรมชาติจากครั่งโดยไม่ใช้สารมอร์แดนท์และใช้สารมอร์แดนท์ต่างๆ ได้แก่ โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต ($KAl(SO_4)_2$) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) และเปรียบเทียบผลการย้อมของวิธีการย้อมที่ต่างกัน ได้แก่ การย้อมมอร์แดนท์ก่อนการย้อมสี การย้อมมอร์แดนท์พร้อมการย้อมสี และการย้อมมอร์แดนท์หลังการย้อมสี โดยใช้ความเข้มข้นของสารมอร์แดนท์ 4 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนเส้นกกต่อน้ำย้อมเท่ากับ 1 ต่อ 30 (%w/v) โดยย้อมที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที (ไพศาล, 2538) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ หลังจากย้อมเสร็จตากที่อุณหภูมิห้องที่มีอากาศถ่ายเท 24 ชั่วโมง และวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่าสี (CIE L*a*b*) และความเข้มสี (K/S)

การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารมอร์แดนท์ในการย้อม

ศึกษาผลของการย้อมเส้นกกด้วยสีย้อมธรรมชาติจากครั่งด้วยสารมอร์แดนท์ที่ทำให้กกติดสีได้ดีที่สุดในเฉดสีแดงและเฉดสีดำ เปรียบเทียบความเข้มข้นสารมอร์แดนท์ที่ต่างกันดังนี้ 0.5, 1, 2 และ 4 กรัมต่อลิตร โดยใช้อัตราส่วนเส้นกกต่อสารละลายน้ำย้อมที่ 1 ต่อ 30 (%w/v) ย้อมด้วยอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ตากที่อุณหภูมิห้องที่มีอากาศถ่ายเท 24 ชั่วโมง ทดสอบวัดค่าสี ความเข้ม (K/S) สีด้วยเครื่อง Spectrophotometer

ศึกษาความแตกต่างของผลการย้อมโดยการวัดค่าการสะท้อนแสง

วัดสีของเส้นกกหลังการย้อม ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Datacolor 550) โดยวัดค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) ของตัวอย่างในช่วงวิสิเบิล คือช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร และคำนวณค่าความเข้มสี (K/S) สามารถคำนวณได้จากสมการ Kulbellka-Munk ดังนี้

$$K/S = \frac{(1-R)^2}{2R}$$

โดยค่า K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

S คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

R คือ ค่าแสงสะท้อนของผิววัตถุที่ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max})

การทดสอบความคงทนของสีและการประเมินผล

การทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู

การทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถูเป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณของสีที่เคลื่อนตัวจากผิวหน้าของวัสดุสิ่งทอที่มีสีไปยังผิวหน้าของวัสดุอื่น โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ISO 105-X12-1987 ใช้ทดสอบสำหรับสิ่งทอทุกชนิดที่อยู่ในรูปของเส้นด้าย ผ้า หรือสิ่งทอที่ใช้ปูพื้น (textile floor covering) ด้วยเครื่อง Electronic crockmeter (การใช้ผ้าขาวแห้งและผ้าขาวเปียกขัดถูกับเส้นกก แล้วประเมินรอยปนเปื้อนสีบนผ้าขาวแห้งและเปียก (รัตนพล, 2549) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer

การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง

การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงเป็นการทดสอบหาความซีดจางจากวัสดุสิ่งทอที่ผ่านการย้อมสีด้วยการกระทำของแสงแดดเทียมซึ่งจำลองการที่วัสดุสัมผัสกับแสงแดดธรรมชาติ (Natural Daylight D65) ด้วยมาตรฐาน ISO 105-B02-1988 (สิรีรัตน์, 2550) การทดสอบทำโดยฉายแสงซีนอนให้กับเส้นกกตัวอย่างและผ้ามาตรฐานขนแกะสีน้ำเงิน (Blue wool light fastness standards) ใต้สภาวะที่กำหนด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของสารมอร์แดนท์และวิธีการย้อมที่เหมาะสมในการย้อมเส้นกกด้วยสีย้อมธรรมชาติจากครั่ง

ผลของการย้อมเส้นกกด้วยสีครั่งโดยไม่ใช้สารมอร์แดนท์และใช้สารมอร์แดนท์ต่างๆ ซึ่งการศึกษาผลของวิธีการย้อมที่เหมาะสม พบว่าการย้อมเส้นกกด้วยสีจากครั่งโดยใช้สารมอร์แดนท์ต่างกันมีผลต่อการติดสี และเฉดสีของเส้นกกทดสอบ เนื่องจากสารมอร์แดนท์เป็นเกลือโลหะ เกิดการจับกับโมเลกุลของสีย้อมธรรมชาติทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนจึงมีเฉดสีเปลี่ยนไป (เทียนศักดิ์, 2534) นอกจากนี้ผลการศึกษาพบว่าวิธีการย้อมเส้นกกที่ต่างกันทำให้การติดสีของเส้นกกต่างกันด้วย โดยจากการทดลองพบว่าเส้นกกที่ผ่านการย้อมด้วยสีครั่งโดยใช้มอร์แดนท์เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) มีความค่าความสว่าง (L*) ของสีลดลง (สีเข้มขึ้น) (Table 1) ส่งผลให้เส้นกกที่ย้อมด้วยวิธีต่างกันทั้ง 3 วิธี ได้ผลเป็นสีเทาดำ โดยมีเฉดสีแดง (a*) และมีเฉดสีเหลือง (b*) ลดลง เมื่อเทียบกับเส้นกกที่ผ่านการย้อมด้วยสีครั่งโดยไม่ใช้มอร์แดนท์ และพบว่าเส้นกกที่ผ่านการย้อมด้วยวิธีย้อมมอร์แดนท์ก่อนการย้อมสีมีค่าความเข้มสี (K/S) มากที่สุด สรุปได้ว่าการย้อมเส้นกกด้วยครั่งโดยใช้สารมอร์แดนท์เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ก่อนการย้อมจะให้ผลเป็นเฉดสีดำเข้มที่สุด

การใช้มอร์แดนท์โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต ($KAl(SO_4)_2$) จะให้ผลการย้อมเป็นสีน้ำตาลอมแดง มีค่าความสว่าง (L*) ของสีลดลง เส้นกกที่ย้อมด้วยวิธีการย้อมมอร์แดนท์ก่อนการย้อมสี และการย้อมมอร์แดนท์พร้อมการย้อมสี มีเฉดสีแดง (a*) เพิ่มขึ้น แต่การย้อมมอร์แดนท์หลังการย้อมสีมีเฉดสีแดง (a*) ลดลง การย้อมมอร์แดนท์ก่อนและหลังการย้อมสีให้เฉดสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น แต่การย้อมมอร์แดนท์พร้อมการย้อมสีมีเฉดสีเหลือง (b*) ลดลง เมื่อเทียบกับเส้นกกที่ผ่านการย้อมด้วยสีครั่งโดยไม่ใช้มอร์แดนท์ และค่าความเข้มสี (K/S) ของเส้นกกที่ย้อมด้วยวิธีการย้อมมอร์แดนท์พร้อมการย้อมสีมีค่ามากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการย้อมเส้นกกด้วยสีครั่งโดยใช้สารมอร์แดนท์พร้อมการย้อมสีให้ค่าการติดสีดีที่สุด และได้เฉดสีออกไปทางเฉดสีแดงมากกว่าวิธีการย้อมแบบอื่น

ในขณะที่การใช้มอร์แดนท์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) มีการติดสีเพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่ติดสีเลยเมื่อมองด้วยตาเปล่า โดยมีค่าความสว่าง (L*) ของสีมากกว่าเส้นกกที่ย้อมโดยไม่ใช้มอร์แดนท์ มีเฉดสีแดง (a*) และเฉดสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และค่าความเข้มสี (K/S) ลดลงเมื่อเทียบกับเส้นกกที่ย้อมโดยไม่ใช้มอร์แดนท์ แสดงให้เห็นว่าการย้อมเส้นกกด้วยสีครั่งโดยใช้สารมอร์แดนท์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ไม่ช่วยติดสี

Table 1 Effect of dyeing method and dyed reed using various mordants of *Laccifer lacca* Keer.

Mordant	Method	CIE Lab				
		L*	a*	b*	K/S	
-	No mordant	43.11	7.07	18.14	14.26	
$Ca(OH)_2$	Pre-mordant	43.46	10.80	18.96	12.53	
	Meta-mordant	46.73	7.16	23.28	13.77	
	Post-mordant	44.81	7.98	19.98	14.04	
$KAl(SO_4)_2$	Pre-mordant	48.21	10.66	26.38	13.26	
	Meta-mordant	29.16	19.91	9.16	14.94	
	Post-mordant	48.03	6.24	22.32	13.31	
$FeSO_2$	Pre-mordant	23.66	3.39	5.60	16.10	
	Meta-mordant	28.01	4.39	9.48	15.18	
	Post-mordant	31.70	4.18	11.32	13.91	

L* = 0 means that the color is dark (black) L* = 100 means that the color is bright) white(

a* > 0 means that the color is red a* < 0 means that the color is green

b* > 0 means that the color is yellow b* < 0 means that the color is blue

K/S color strength

การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารมอร์แดนท์ในการย้อม

จากการศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารมอร์แดนท์ในการย้อม โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของมอร์แดนท์ที่ 0.5, 1, 2 และ 4 กรัมต่อลิตร โดยการย้อมเส้นกกด้วยครั่งโดยใช้โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต ($KAl(SO_4)_2$) เป็นมอร์แดนท์ ใช้วิธีการย้อมมอร์แดนท์พร้อมการย้อมสี พบว่าความเข้มข้นโพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต ($KAl(SO_4)_2$) ที่ 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร ให้ผลความเข้มสี (K/S) สูงขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด และอัตราการเพิ่มขึ้นของสีเริ่มน้อยลงเมื่อใช้โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต ($KAl(SO_4)_2$) ตั้งแต่ 2 จนถึง 4 กรัมต่อลิตร ดังแสดงใน Figure 1 โดยการย้อมเส้นกกด้วยครั่งโดยใช้มอร์แดนท์เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) วิธีการย้อมมอร์แดนท์ก่อนการย้อมสี พบว่าที่ความเข้มข้นต่างกันมีผลต่อความเข้มสี (K/S) และเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร ให้ผลความเข้มสี (K/S) สูงที่สุด ดังแสดงใน Figure 2

Figure 1 Effect of $KAl(SO_4)_2$ concentration are 0.5, 1, 2 and 4 g/l on K/S of dyed reed

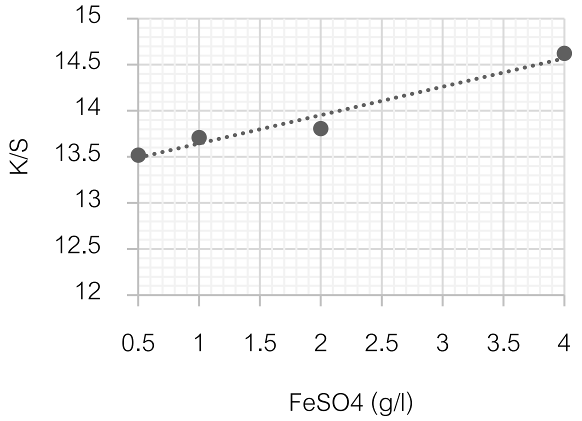


Figure 2 Effect of $FeSO_4$ concentration are 0.5, 1, 2 and 4 g/l on K/S of dyed reed.

การทดสอบความคงทนของสีและการประเมินผล

การทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถูและแสงของเส้นกกที่ย้อมโดยไม่ใช้มอร์แดนท์และใช้มอร์แดนท์ต่างๆ คือ โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต ($KAl(SO_4)_2$ และเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ที่ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร ผลการประเมินการเปื้อนติดสีของผ้าทดสอบจากการทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู พบว่าการย้อมเส้นกกโดยใช้โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต ($KAl(SO_4)_2$) เป็นสารมอร์แดนท์ ด้วยวิธีการย้อมมอร์แดนท์พร้อมการย้อมสีเป็นวิธีที่มีการติดสีดีที่สุด ความคงทนของสีในขณะแห้งอยู่ในระดับดี (4) และในขณะเปียกอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ (2) ส่วนการย้อมเส้นกกโดยใช้เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เป็นสารมอร์แดนท์ การย้อมมอร์แดนท์ด้วยวิธีการย้อมมอร์แดนท์ก่อนการย้อมสีซึ่งเป็นวิธีที่ดีที่สุด ความคงทนของสีในขณะแห้งอยู่ในระดับปานกลาง-ดี (3-4) และในขณะเปียกอยู่ในระดับดี (4) นอกจากนั้นพบว่าเส้นกกที่ย้อมด้วยสีครั่งโดยไม่ใช้มอร์แดนท์ความคงทนของสีในขณะแห้งอยู่ในระดับดีมาก (5) และในขณะเปียกอยู่ในระดับปานกลาง-ดี (3-4) ดังแสดงใน Table 2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้สารมอร์แดนท์ไม่ทำให้คุณสมบัติความคงทนของสีต่อการขัดถูเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเส้นกกที่ย้อมโดยไม่ใช้มอร์แดนท์ซึ่งมีสีอ่อน การเปื้อนติดสีของผ้าทดสอบจึงน้อย ในขณะที่เส้นกกย้อมด้วยมอร์แดนท์โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟตย้อมมอร์แดนท์พร้อมการย้อมสี และเส้นกกที่ย้อมด้วยมอร์แดนท์เฟอรัสซัลเฟตย้อมมอร์แดนท์ก่อนการย้อมสีมีสีเข้ม การเปื้อนติดสีของผ้าทดสอบจึงมากกว่า ทำให้ผลการทดสอบของเส้นกกที่ย้อมโดยไม่ใช้มอร์แดนท์อยู่ในระดับดีกว่าเส้นกกที่ย้อมโดยใช้มอร์แดนท์

การทดสอบการคงทนของสีต่อแสงของเส้นกก ผลการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีเส้นกกหลังการทดสอบ พบว่าเส้นกกที่ย้อมด้วยสีครั่งโดยไม่ใช้มอร์แดนท์ พบว่าความคงทนของสีอยู่ในระดับดีปานกลาง (4) เท่ากับเส้นกกที่ย้อมด้วยสีครั่งโดยใช้มอร์แดนท์โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต ($KAl(SO_4)_2$) ด้วยวิธีการย้อมมอร์แดนท์ก่อนการย้อมสี และพบว่าการย้อมเส้นกกด้วยสีครั่ง โดยย้อมมอร์แดนท์พร้อมและการย้อมมอร์แดนท์หลังการย้อมสีอยู่ในระดับดีปานกลาง-ดี (4-5) และผลการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีการใช้เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เป็นมอร์แดนท์ พบว่าอยู่ในระดับดีปานกลาง-ดี (4-5)

Table 2 Rubbing and light fastness values[a] of dyed reed using mordant concentration at 4 g/l.

Mordant	Dyeing method	Rubbing fastness[b]		Light fastness[c]
		Dry	Wet	
No mordant	Direct	5	3-4	4
$KAl(SO_4)_2$	Pre-mordant	4-5	2-3	4
	Meta-mordant	4	2	4-5
	Post-mordant	4-5	4	4-5
$FeSO_4$	Pre-mordant	3-4	4	4-5
	Meta-mordant	3	3-4	4-5
	Post-mordant	3	3	4-5

a Rubbing fastness values: color staining ranges from 1 very poor (high stained) to 5 excellent (low stained)

b Light fastness values: blue wool references range from 1 very poor (very high color change) to 8 excellent (very low color change)

สรุป

สารมอร์แดนท์และวิธีย้อมมีผลต่อเฉดสีและการติดสีของการย้อมเส้นกกด้วยครั่ง พบว่าเมื่อใช้เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เป็นมอร์แดนท์ การย้อมที่เหมาะสมที่สุด คือวิธีการย้อมมอร์แดนท์ก่อนการย้อมสี ที่ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร โดยมีการติดเฉดสีดำที่เข้มมากที่สุด และพบว่าการใช้โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต ($KAl(SO_4)_2$) การย้อมที่เหมาะสมที่สุด คือวิธีการย้อมมอร์แดนท์พร้อมการย้อมสี เนื่องจากเป็นวิธีที่มีการติดเฉดสีแดงมากที่สุด โดยที่ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร ให้ความเข้มสีมากที่สุด แต่ที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตรมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากค่าความเข้มสี (K/S) ของเส้นกกที่ความเข้มข้น 2 และ 4 กรัมต่อลิตรมีความต่างเล็กน้อยเท่านั้น จึงเลือกความเข้มข้นที่ใช้สารมอร์แดนท์น้อยกว่าเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด การทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถูและแสงของเส้นกก พบว่าการใช้สารมอร์แดนท์ทำให้ความคงทนของสีต่อแสงแดดเทียมดีขึ้นแต่ไม่มีผลต่อความคงทนต่อการขัดถู

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มสตรีทอเสื่อกกหมู่บ้านเสม็ดงาม จังหวัดจันทบุรีที่ช่วยรวบรวมเส้นกกที่ใช้ในการทดลอง และขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ในชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม” ปีงบประมาณ 2562 ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จุฑาทิพย์ ปุระมงคล. 2548. **การศึกษาและพัฒนาลวดลายเสื่อจันทบูร.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นนทลี ชินวงศ์อมง. 2543. **จลนพลศาสตร์แลผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย้อมสีไหมด้วยครั่ง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไพศาล คงคาฉุยฉาย. 2538. **รายงานการวิจัยเทคนิคการย้อมเส้นไหมด้วยสีครั่ง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รัตนพล มงคลรัตนาสิทธิ์. 2549. **วิธีการทดสอบความคงทนของสีบนวัสดุสิ่งทอมาตรฐาน.** พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

ศรนารายณ์ วรพจน์. 2553. **การวิเคราะห์ผลตอบแทนจากการเพราะครั่ง.** การค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สิริรัตน์ จารุจินดา. 2550. ความคงทนของสีต่อแสง : ตอน 1. **Colourway** 13 (72): 42-44

สำนักงานวัฒนธรรมจังหวัดจันทบุรี (2561)

อารีย์ สิทธิบาล. 2553. **การพัฒนาสูตรส่วนผสมสีย้อมกกทอเสื่อจากวัสดุท้องถิ่น.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

Chairat, M., S. Rattanaphani, J.B. Bremner and V. Rattanaphani. 2008. Adsorption Kinetic Study of Lac Dyeing on Cotton. **Dyes and Pigments** 76: 435-439.

Teli, M.D., S. Valia and D. Kolambkar and R. Trivedi. 2014. Dyeing of Organic Cotton Fabric with Lac Dye using Different Mordants. **Journal of the Textile Association** 74: 337-341.

เทียนศักดิ์ เมฆพรรณโอภาส. 2534. สีย้อมธรรมชาติกับการย้อม. **วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินวิโรฒ มหาสารคาม** 10 (1): 1-9.

Quality Modification of the Reformed Chicken Meat Using Xanthan Gum for Nugget Preparation

Panusorn Choosuk[1], Patchara Damkrut[1] and Rungnaphar Pongsawatmanit[1*]

ABSTRACT

Reformed chicken meat plays an important role in the production of reformed chicken nuggets. Since the binding properties of the comminuted meats are required, hydrocolloids are used because of their ability to bind water and form gels in reformed meat. Xanthan gum (Xan) was selected to study as a binding agent in this study. The effect of xanthan gum (Xan) on the quality of raw batters containing Xan (0, 0.15, 0.30 and 0.45%) was investigated. The reformed chicken meat with and without Xan was prepared by mixing chicken breast) 67.8%), 10% palm olein oil, 10.3% ice flakes and 11.9% other dried ingredients. The qualities of raw batter samples and cooked reformed chicken meat were performed. The water holding capacity of raw batter and cooked reformed chicken meat increased with increasing Xan content in the formulations. Cooking yield was improved with Xan addition. The quality of cooked reformed chicken meat with different Xan concentrations was also determined. The lower cooking loss was observed in the samples containing Xan. The hardness, gumminess and chewiness including shear force values of the cooked reformed chicken meat decreased with increasing Xan contents. The results suggested that Xan could be used to modify and enhance the quality of reformed chicken meat for further application in the chicken nugget preparation.

Key words: Reformed chicken meat, Xanthan gum, Water holding capacity, Shear force, Texture

* Corresponding author; e-mail address: fagiruw@ku.ac.th

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Emulsified meat products are prepared by grinding meat in the salt, fat and chilled water, resulting in a continuous formation where small fat droplets remain dispersed. The restructured meat product is a product that can be prepared from various types of meat (Choi *et al.*, 2010). Fresh comminuted meats used as raw materials in restructured meat can be modified to yield desirable sensory quality and shelf life quality of the product by mixing with other ingredients. However, the problems of binding the comminuted meats together have been observed (Sarteshnizi *et al.,* 2015). Hydrocolloids with their unique characteristics are of great interest in processed meat due to their ability to bind water and form gels (Candogan and Kolsarici, 2003).The texture of processed meat products depends on the structure of the matrix formed by the protein gel, the solutes, the particles entrapped in the gel and the moisture content (Tahmasebi *et a*l., 2016).

Xanthan gum (Xan) is an anionic microbial hetero-polysaccharide produced by Xanthomonas campestris. Xan is reported to provide an excellent stability in thermal and acid systems including enhancing the viscosity stability (Tunnarut and Pongsawatmanit, 2018). Low concentration of the Xan is used to produce high yield stress value in the product, high viscosity, high pseudoplastic flow behavior, and high stability over wide ranges of pH, temperature and salt concentration (Demirci *et al.,* 2014). Therefore, the effect of Xan on the quality of raw batters and cooked reformed chicken meat containing different Xan concentrations was investigated. The results gained from this study were expected to further apply in nugget industry.

MATERIALS AND METHODS

1. Materials

The chicken breast, wheat flour (WF) (Thai flour mill industry Co., Ltd), commercial refined salt (Prungthip, Thailand), sodium tripolyphosphate (STPP), sugar and other food ingredients were purchased from the local market. Xanthan gum (C.E. Roeper GmbH, hamburg, Germany) was used without any further purification. The moisture contents of Xan and WF were 10.4% and 11.4%, respectively.

2. Preparation of reformed chicken meat

The reformed chicken meat with and without Xan (0, 0.15, 0.30 and 0.45%) was prepared by mixing with chicken breast) 67.8%), 10% palm olein oil, 10.3% ice flakes and 11.9% other ingredients (wheat flour, sugar, garlic powder, salt, white pepper powder and sodium tripolyphosphate (STTP)). Xan was added by partial substitution of chicken breast portion. For each formulation, 500g of the raw batter was prepared.

Chicken breast was cut into small pieces and then mixed with salt and STTP using a blender (FPP230, Kenwood, Hampshire, UK). Salt and phosphate act to solubilize myofibrillar proteins to ensure stable meat product binding whereas protein and carbohydrates function as the retention of product structure. Adding ice flakes, then palm oil and finally other dry ingredients (sugar, wheat flour, Xan and seasoning powders) was performed using the blender to obtain final raw batter. The temperatures of each raw batter were controlled to lower than 12°C. Then, the raw batter was filled into the plastic mould (2.8 cm width, 3.2 cm length and 1 cm thickness) and cooled at -18° C for 2 h prior to steam-cooking at 100°5±C for 0.5 h with the internal temperature higher than 75°C (modified from Xavier *et al.*, 2017). The raw batter samples were analyzed for water holding capacity (WHC) and cooking yield. Water holding capacity, cooking loss, shear force and texture profile analysis (TPA) were determined for the quality of cooked reformed chicken meat.

3. Determination of the quality of raw reformed chicken meat batter with and without Xan

- Water holding capacity (WHC): Water holding capacity (WHC) was determined by the modified method of Jridi *et al.* (2015). Each raw batter (10 g) sample was placed on a filter paper (Whatman No. 4, UK), which was kept in the middle of a 50 ml centrifuge tube. After centrifugation at 10,500 g for 5 min (15°C), the WHC could be obtained by calculating the values as shown in Equation (1)

$$\text{WHC} = (W_{ac}/W_{bc}) \times 100 \qquad (1)$$

where W_{ac} and W_{bc} are the weights of samples after and before centrifugation, respectively.

- Cooking yield: The cooking yield was determined using the modified method of Das *et al.* (2008). The raw batter was shaped in the mould (2.8 cm width, 3.2 cm length and 1 cm thickness) and cooled at -18°C for 2 h prior to steam-cooking at 100°5±C for 0.5 h. Then samples were cooled to room temperature (30°C). The weights of cooked and raw batter with and without Xan addition were recorded for determining the cooking yield as shown in Equation (2).

$$\text{Cooking yield} = \frac{\text{Weight of cooked reformed chicken meat}}{\text{Weight of raw reformed chicken meat}} \times 100 \qquad (2)$$

4. Determination of the quality of cooked reformed chicken meat with and without Xan

- Cooking loss: Each raw batter (10 g) placed into 50 mL centrifuge tube was heated in water-bath at 95±5°C for 30 min (the internal temperature >75°C) and then cooled in ice -water for 20 min. After further storage at 5±1°C for overnight, cooked samples were removed from the centrifuge tube. Cooking loss (%) was calculated as a percentage of the weight difference before and after cooking based on the weight before cooking (modified from Lesiow *et al.*, 2017).

- Water holding capacity (WHC): WHC was determined by modified method from Jridi *et al*. (2015). The cooked reformed chicken meat (10 g) sample was placed on a filter paper (Whatman No. 4, UK) which was kept in the middle of a 50 ml centrifuge tube. After centrifugation at 10,500 g for 5 min at 15°C, WHC was calculated as shown in Equation (1).

- Shear force: The reformed chicken meat samples were prepared in a plastic tube (16 mm diameter), then steamed at 100±5°C for 30 min for cooking and were kept at 5°C for overnight prior to cut into the cylindrical shape with 30±1 mm length for shear force and 16±1 mm height for TPA measurement. A shear force measurement of the cooked reformed chicken meat was performed at 25°C using the Texture Analyzer (TA-XT plus, Stable Micro System, UK) with a 50 kg load cell and equipped with a Texture Exponent 32 software program by modifying the method of Cofrades *et al.* (2000). Each piece of the cooked reformed chicken meat was compressed at cross-head speed of 100 mm/min using a Warner–Bratzler blade (60° V-shaped blade) to cut through the sample (16 mm). The shear force values were read from the maximum force (N) of the curve cut through the cross-section of the sample. Mean values were obtained from the measurement of nine cooked reformed chicken meat pieces.

- Texture profile analysis (TPA): TPA of the cooked reformed chicken meat was performed according to the modified method of Zheng *et al*. (2017). A standard double-cycle program of TPA test was used to compress the cooked reformed chicken meat by a distance of 30% compression of the original sample height at a speed of 30 mm/min using a 50 mm diameter probe. At least 9 cylindrical samples of cooked reformed chicken samples were measured to obtain an average value for all TPA parameters, i.e., hardness, cohesiveness, springiness, gumminess and chewiness (Prabpree and Pongsawatmanit, 2011).

5. Statistical analysis

All experiments were performed in triplicate. The results were reported as the mean ± standard deviation and subjected to analysis of variance (ANOVA). Differences among the means were determined using Duncan's multiple range test (DMRT) and significance was defined at $p<0.05$.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Quality of raw reformed chicken meat batter with and without Xan

The WHC of raw batters prepared from different Xan concentrations by replacing chicken breast with Xan (0 to 0.45%) showed that the WHC increased with increasing Xan content (Table 1, $p<0.05$) expecting from the high cooking yield obtained from the addition of Xan in the raw batters. Xan

addition significantly improved WHC in raw batters from 85.6 to 90.4 (%) for 0% to 0.45% Xan, respectively. Verbeken *et al*. (2005) also reported that k-carrageenan was found to increase the WHC of the meat protein.

The reformed chicken meat batter containing 0.45% Xan showed the highest cooking yield (98.6%) whereas the control sample (without Xan addition) had cooking yield about 96.6% (Table 1). The results suggest that Xan contributing to the higher WHC of the product could enhance the cooking yield in the final product due to the reduction of water loss in the raw batter.

Table 1 Water holding capacity (WHC) and cooking yield of raw reformed chicken meat batter containing different Xan contents.

Xanthan gum (%)	WHC (%)	Cooking yield (%)
0	85.6 ± 0.6^{d}	96.6 ± 0.7^{c}
0.15	87.2 ± 0.3^{c}	97.6 ± 0.6^{b}
0.30	88.2 ± 0.9^{b}	97.9 ± 0.5^{b}
0.45	90.4 ± 0.7^{a}	98.6 ± 0.5^{a}

Mean ± standard deviation values (n = 3) followed by a different lower-case letter within the same column are significantly different (p<0.05) by Duncan's multiple range test.

2. Quality of cooked reformed chicken meat with and without Xan

Since WHC is defined as the ratio of moisture retained in the sample to the initial moisture content (Rather *et al*., 2016); therefore, the higher percentage of WHC suggests the release of less moisture. After cooking, WHC of the cooked reformed chicken meat increased with increasing Xan (Table 2, p<0.05). Addition of 0.45% Xan significantly increased the WHC of the cooked reformed chicken meat (p<0.05) to 98.9%. The cooking loss decreased with Xan addition. The higher WHC resulted in a lower cooking loss in cooked reformed chicken meat containing Xan (Table 2). The results indicate that the addition of Xan had a favorable influence on reduction of cooking loss due to the contribution of Xan binding more water in the reformed chicken meat during steam heating.

Table 2 Water holding capacity and cooking loss of cooked reformed chicken meat containing different xanthan gum contents.

Xanthan gum (%)	WHC (%)	Cooking loss (%)
0	95.7 ± 0.6^{c}	3.2 ± 0.7^{a}
0.15	97.2 ± 0.6^{b}	2.5 ± 0.4^{b}
0.30	98.5 ± 0.6^{a}	2.3 ± 0.2^{b}
0.45	98.9 ± 0.6^{a}	2.0 ± 0.5^{b}

Mean ± standard deviation values (n = 3) followed by a different lower-case letter within the same column are significantly different (p<0.05) by Duncan's multiple range test.

The shear forces of the cooked reformed chicken meat samples containing different Xan contents were determined as shown in Table 3. The tenderness of the samples was recorded as the maximum force to cut through the cross section of the sample called shear force. The shear force exhibited the lower values with increasing Xan content (Table 3, p<0.05) indicating that cooked reformed chicken meat containing higher Xan content required lower force to shear expecting from the higher WHC of the cooked meat (Table 2).

Texture profile analysis is a very useful technique for evaluating food quality in product development. In this study, hardness (defined as the maximum force of the first compression to 30% deformation of the original sample height), gumminess and chewiness values decreased significantly with increasing Xan (Table 3, p<0.05) from about 14.3 to 11.0 N, 11.1 to 8.6 M and 9.98 to 7.81 N mm for 0 to 0.45% substitution, respectively. The cohesiveness and springiness revealed no significant difference for the cooked samples. The results implied that lower force was required to compress the cooked reformed meat containing Xan.

Table 3 Shear force and textual profile analysis of cooked reformed chicken meat containing different xanthan gum contents.

Xan (%)	Shear force (N)	Hardness (N)	Cohesiveness	Springiness	Gumminess (N)	Chewiness (N·mm)
0	10.02±0.91[a]	14.3±1.0[a]	0.90±0.02[a]	0.78±0.03[a]	11.12±0.89[a]	9.98±0.74[a]
0.15	9.01±0.84[b]	13.1±0.9[b]	0.90±0.02[a]	0.78±0.01[a]	10.17±0.67[b]	9.12±0.55[b]
0.30	8.13±0.42[c]	11.5±1.0[c]	0.90±0.03[a]	0.78±0.02[a]	8.94±0.81[c]	8.02±0.68[c]
0.45	7.33±0.32[d]	11.0±1.0[c]	0.90±0.02[a]	0.78±0.02[a]	8.63±0.78[c]	7.81±0.76[c]

Mean± standard deviation values (n = 9) followed by a different lower case letters within the same column are significantly different (p<0.05) using Duncan's multiple range test

The correlation between hardness and WHC of cooked reformed chicken meat was determined as shown in Figure 1. The hardness decreased with increasing WHC indicating the contribution of the Xan in cooked reformed chicken meat could be applied in food industry for increasing the WHC (higher yield) with lower hardness of the meat.

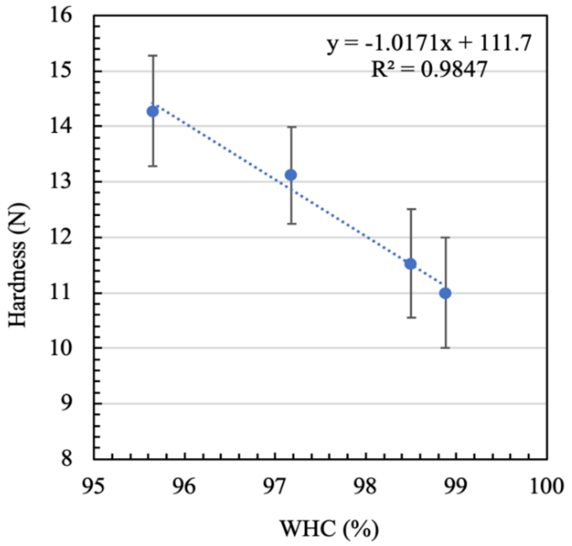


Figure 1 Correlation of hardness and WHC of cooked reformed chicken meat containing different Xan contents.

CONCLUSION

Xan could be used to alter or modify the quality of the cooked reformed chicken meat by enhancing WHC and cooking yield. The cooking yield increased whereas the hardness and shear force decreased with Xan addition. A good correlation between the hardness and WHC of cooked reformed meat was obtained. The information gained from this study could be further applied in chicken nugget industry.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported, under the Strengthening and Developing New Researcher Plan, in conformance with the research and Innovation of Graduate Study Strategy of the National Research Council of Thailand (NRCT) as of the fiscal year 2019.

REFERENCES

Candogan, K. and N. Kolsarici. 2003. The effects of carrageenan and pectin on some quality characteristics of low-fat beef frankfurters. **Meat Science.** 64: 199-206.

Choi, Y.S., J.H. Choi, D.J. Han, H.Y. Kim, M.A. Lee, H.W. Kim, J.W. Lee, H.J. Chung and C.J. Kim. 2010. Optimization of replacing pork back fat with grape seed oil and rice bran fiber for reduced-fat meat emulsion systems. **Meat Science.** 84: 212-218.

Cofrades, S., M.A. Guerra, J. Carballo, F. Fernández-Martín and F.J. Colmenero. 2000. Plasma protein and soy fiber content effect on bologna sausage properties as influenced by fat level. **Journal of Food Science.** 65: 281-287.

Das, A.K., A.S.R .Anjaneyulu, Y.P .Gadekar, R.P .Singh and H .Pragati .2008 .Effect of full-fat soy paste and textured soy granules on quality and shelf-life of goat meat nuggets in frozen storage . **Meat Science.** 80: 607-614.

Demirci, Z.O., I. Yılmaz and A.S. Demirci. 2014. Effects of xanthan, guar, carrageenan and locust bean gum addition on physical, chemical and sensory properties of meatballs. **Journal of Food Science and Technology.** 51: 936-942.

Jridi, M., O. Abdelhedi, N. Souissi, M. Kammoun, M. Nasri and M.A. Ayadi. 2015. Improvement of the physicochemical, textural and sensory properties of meat sausage by edible cuttlefish gelatin addition. **Food Bioscience.** 12: 67-72.

Lesiow, T., G.K. Rentfrow and Y.L. Xiong. 2017. Polyphosphate and myofibrillar protein extract promote transglutaminase-mediated enhancements of rheological and textural properties of PSE pork meat batters. **Meat Science.** 128: 40-46.

Prabpree, R. and R. Pongsawatmanit. 2011. Effect of tapioca starch concentration on quality and freeze-thaw stability of fish sausage. **Kasetsart Journal (Natural Science).** 45: 314-324.

Rather, S.A., F.A. Masoodi, R. Akhter, J.A. Rather, A. Gani, S.M. Wani and A.H. Malik 2016. Application of guar–xanthan gum mixture as a partial fat replacer in meat emulsions. **Journal of Food Science and Technology.** 53: 2876-2886.

Sarteshnizi, R.A., H. Hosseini, A.M. Khaneghah and N. Karimi. 2015 . A review on application of hydrocolloids in meat and poultry products. **International Food Research Journal**. 22: 872-887.

Tahmasebi, M., M. Labbafi, Z. Emam-Djomeh and M.S. Yarmand. 2016. Manufacturing the novel sausages with reduced quantity of meat and fat: The product development, formulation optimization, emulsion stability and textural characterization. **LWT-Food Science and Technology**. 68: 76-84.

Tunnarut, D. and R. Pongsawatmanit. 2018. Modified quality of seasoning syrup for coating and enhancing properties of a food model using xanthan gum. **Agriculture and Natural Resources**. 52: 298-304.

Verbeken, D., N. Neirinck, P. Van Der Meeren, and K. Dewettinck. 2005. Influence of **K**-carrageenan on the thermal gelation of salt-soluble meat proteins. **Meat Science** 70: 161-166.

Xavier, K.M., N. Kannuchamy, A.K. Balange, M.K. Chouksey and V. Gudipati. 2017. Functionality of chitosan in batter formulations for coating of fish sticks: Effect on physicochemical quality. **Carbohydrate Polymers.** 169: 433-440.

Zheng, H.B., M.Y. Han, H.J. Yang, C.B. Tang, X.L. Xu and G.H .Zhou. 2017. .Application of high pressure to chicken meat batters during heating modifies physicochemical properties, enabling salt reduction for high-quality products .**LWT -Food Science and Technology.** 84: 693-700.

ผลของการปรับปรุงคุณภาพกาแฟโรบัสต้าด้วยกระบวนการพรีทรีตเม้นเมล็ดกาแฟดิบ

Effect of Robusta Coffee Quality Improvement by Pretreatment of Green Coffee Bean

อชิตพล ธีระเรืองไชยศรี[1] ปิยะวัฒน์ จูรณสิริพงศ์[1] อัญชิษฐา ฤกษ์คุณาทัย[1] และ สิชญา สิทธิพจน์[1*]

Achitphon Teeraruangchaisri[1], Piyawat Jooronsiriphong[1], Unchitta Rukkunathai[1] and Sichaya Sittipod[1*]

บทคัดย่อ

กาแฟเป็นหนึ่งในเครื่องดื่มปราศจากแอลกอฮอล์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านรสชาติ กลิ่น และสีของกาแฟกาแฟดิบสายพันธุ์โรบัสต้าที่ผ่านการพรีทรีตเม้นด้วยสาร 7 ชนิดคือ สารละลายกรดอะซิติก, กรดอะซิติกผสมฟรุกโตส, ฟรุกโตส, ฟรุกโตสไซรัป, กลูโคสไซรัป, ซูโครสและน้ำคั้นจากแกนสับปะรด การอินฟิวชั่นสารละลายเข้าสู่เมล็ดกาแฟดิบทำภายใต้ความดัน -680 mm Hg เป็นเวลา 10 นาที และอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำเมล็ดกาแฟดิบไปคั่วที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเครื่องดื่มกาแฟด้วยผู้ชิมจำนวน 19 คน ด้วย Hedonic test และให้ผู้ชิมอธิบายคุณลักษณะที่สัมผัสได้จากตัวอย่าง พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีรสชาติและสี ที่ต่างออกไปจากกาแฟควบคุม แต่มีคุณสมบัติด้านกลิ่นไม่แตกต่าง ($p > 0.05$) โดยสารละลายกลูโคสไซรัป ฟรุกโตสไซรัปและกรดอะซิติกผสมฟรุกโตส มีรสเปรี้ยวและขมลดลงและได้รับคะแนนความชอบด้านรสชาติสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ($p < 0.05$) แสดงว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลาย มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาคุณภาพกาแฟโรบัสต้าให้ผู้บริโภคมีความยอมรับสูงขึ้น

ABSTRACT

Coffee is one of the most popular non-alcoholic beverages in the world. This project aimed to study the pretreatment conditions and changes in taste, aroma and color of Robusta coffee treated with 7 different solution of acetic acid, acetic acid and fructose, fructose, fructose syrup, glucose, sucrose and pineapple pulp’s juice. Infusion of solutions into the raw coffee beans were performed under vacuum at -680 mm Hg for 10 minutes then dried at 45 degree Celsius for 3 hours. The beans were roasted at 250 degree Celsius for 12 minutes. Sensory evaluation was conducted using hedonic test with 19 panelists. Panelists describe the characteristic that can be detected from sample. The results indicated that the treated coffees have different taste, and color compared to control coffee but aroma isn’t different ($p > 0.05$). Coffee prepared from green bean treated with glucose syrup, fructose syrup and acetic acid mixed with fructose have lower sourness and bitterness and received higher sensory scores than control coffee ($p < 0.05$). This work suggests high potential for using pretreatment solutions to improve Robusta coffee quality and increase consumer acceptability.

Key words: coffee bean, Robusta coffee, pretreatment, vacuum infusion, sugar

* Corresponding author; e-mail address: Sichaya.s@ku.ac.th

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

กาแฟเป็นพืชเขตร้อนที่เป็นสินค้าเครื่องดื่มเชิงพาณิชย์ที่สำคัญมากที่สุดรองจากน้ำมันปิโตเลียม (Getachew and Chun, 2019) เครื่องดื่มกาแฟเตรียมได้จากการนำเมล็ดกาแฟดิบไปคั่วและบดชงเป็นเครื่องดื่ม กาแฟดิบไม่มีสีและกลิ่นหอมของกาแฟคั่ว สาเหตุหลักของการเกิดกลิ่นหอมและรสชาติอันเป็นเอกลักษณ์นั้นคือการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดในระหว่างคั่วกาแฟ สารตั้งต้นทางเคมีเช่น น้ำตาล กรด โปรตีน และสารประกอบฟีนอลิกเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการเกิดสารให้กลิ่นรสของกาแฟ (Fisk *et al.*, 2012) การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้นจึงเป็นวิธีการที่ดีในการปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเครื่องดื่มกาแฟ จากผลการศึกษาของ Liu et al. (2019a) และ Liu *et al.* (2019b) พบว่าการใช้ความดันในการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลภายในเมล็ดกาแฟก่อนการคั่วและการแช่เมล็ดกาแฟดิบในสารละลายกรดอะซิติก ส่งผลต่อกลิ่นรสสุดท้ายของเครื่องดื่มกาแฟที่ผลิต โดยเมล็ดกาแฟที่เพิ่ม ฟรุกโตสให้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสดีที่สุดเมื่อเทียบกับกลูโคสและซูโครส ซึ่งจากการทดลองเป็นการใช้ ฟรุกโตสในรูปผลึก การทำแวคคิวอัมอินฟิวชั่นในการใช้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศเพื่อเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นของกลิ่นและรสชาติแก่เมล็ดกาแฟดิบจึงเป็นขบวนการที่น่าสนใจในการปรับปรุงคุณภาพกาแฟ งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อทำการศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการแวคคิวอัมอินฟิวชั่นซึ่งใช้หลักการลดความดันเพื่อดึงสารละลายจากภายนอกเข้าสู่เมล็ดหรือชิ้นของวัตถุดิบในขณะที่แรงดันถูกปรับเข้าสู่ความดันบรรยากาศและชนิดของสารละลายที่มีความเหมาะสม ในการช่วยปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดกาแฟดิบสายพันธุ์โรบัสต้า ให้มีรสชาติและกลิ่นรสเปลี่ยนแปลงไปจากกาแฟที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ โดยใช้สารละลายกรดอะซิติก, น้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองเดิมของ Liu et al. (2019a) ฟรุกโตสไซรัปเป็นการทดสอบทางเลือกในการใช้ฟรุกโตสในรูปแบบที่มีการใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมไทย กรดอะซิติกผสมฟรุกโตสดูผลของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำตาลและกรดในเมล็ดกาแฟ และน้ำคั้นจากแกนสับปะรด เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ผลไม้ที่มีกรดและน้ำตาลในการปรับปรุงกาแฟดิบ โดยทั้งหมดทดสอบด้วยการทดสอบทางประสาทสัมผัส ด้วย 9-point Hedonic test

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมสารละลายปรับปรุงคุณภาพ

สารเคมีน้ำตาลและกรดในการทดลองได้รับซื้อจากบริษัท กรุงเทพ เคมี จำกัด เลขที่ 11 ถนนรามอินทรา แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว กทม.10230

1. การเตรียมสารละลายกรดอะซิติก 2%

ทำการเจือจางกรดกลาเซียอะซิติกเข้มข้น ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร ให้ได้ความเข้มข้น 2% (v/v)

2. การเตรียมสารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 15% (w/v)

น้ำตาล 4 ชนิดคือซูโครส(น้ำตาลทรายขาว) ฟรุกโตส ฟรุกโตสไซรัป (42% fructose) กลูโคสไซรัป (26% Dextrose equivalent (DE)) ถูกชั่งและผสมกับน้ำ ในอัตราส่วน 15 กรัม ต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร

3. การเตรียมสารละลายผสมของกรดอะซิติก 2% และน้ำตาลฟรุกโตส

ทำการผสมกรดอะซิติก 2% จากข้อที่ 1 กับน้ำตาลฟรุกโตสในอัตราส่วน น้ำตาลฟรุกโตส 15 กรัมและสารละลายกรดอะซิติก 2% 100 มิลลิลิตร

4. การเตรียมน้ำคั้นจากแกนสับปะรด

นำแกนและชิ้นเนื้อสับปะรดที่เหลือจากการปอกตัดแต่ง มาทำการปั่นภายในเครื่องปั่นอาหารกับ น้ำกลั่นในอัตราส่วน กากสับปะรด 100 กรัมต่อน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร กรองน้ำกากสับปะรดที่ได้ด้วยผ้าขาวบาง

กระบวนการแช่

ทำการแช่ตัวอย่างเมล็ดกาแฟโรบัสต้าดิบจำนวน 200 กรัม ในสารละลาย 7 ชนิดคือ กรดอะซิติก 2% , สารละลายผสมของกรดอะซิติก 2% และ ฟรุกโตส 15% (w/v), สารละลายฟรุกโตส 15% (w/v), สารละลายฟรุกโตสไซรัป 15% (w/v), สารละลายกลูโคสไซรับ 15% (w/v), สารละลายซูโครส 15% (w/v) และ น้ำคั้นจากแกนสับปะรด นำตัวอย่างเมล็ดกาแฟเข้าเครื่องแวคคิวอัมไมโครเวฟทำการอินฟิวชั่นโดยใช้ปั้มดูดอากาศลดความดันลงให้ได้ที่ -680 mm Hg และทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที ก่อนปรับความดันกลับมาที่ระดับบรรยากาศ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ใช้เมล็ดกาแฟแช่น้ำกลั่นเป็นตัวอย่างควบคุม ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD)

การอบแห้ง

ทำแห้งตัวอย่างกาแฟดิบด้วยการอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนเมล็ดกาแฟดิบมีความชื้นไม่เกิน 12.5% และค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ ไม่เกิน 0.75

กระบวนการคั่วกาแฟ

นำเมล็ดกาแฟอบแห้งมาทำการคั่ว (เครื่องคั่วกาแฟยี่ห้อ Gene Café รุ่น) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที

การวิเคราะห์ทางเคมีกายภาพ

1. ความชื้นของเมล็ดกาแฟดิบ

ใช้ตัวอย่างกาแฟจำนวน 10 กรัมอบในถ้วยอลูมิเนียมภายในตู้อบลมร้อน 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ±0.5 ชั่วโมงแล้วเก็บในเดซิกเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (มาตรฐานสินค้าเกษตร มกศ. 5701-2561) เมล็ดกาแฟดิบต้องมีความชื้นไม่เกิน 12.5%

2. ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ของเมล็ดกาแฟดิบ

วัดด้วยเครื่อง AQUALAB 4TE (มาตรฐานสินค้าเกษตร มกศ. 5701-2561) ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ ไม่เกิน 0.75

3. ค่าสีของกาแฟคั่ว

วัดค่าสีของกาแฟคั่วด้วยเครื่อง HunterLab UltraScan Pro ในหน่วย L*a*b* เพื่อหาความแตกต่างด้านสีของเมล็ดกาแฟโดยวิเคราะห์ ค่า L*a*b* เพื่อดูโทนสีที่แตกต่างกันของแต่ละตัวอย่างกาแฟ

การศึกษาคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของเครื่องดื่มกาแฟ

เตรียมเครื่องดื่มกาแฟโดยบดกาแฟด้วยเครื่องบดกาแฟยี่ห้อ ลิโนดิ โมเดล 600N ความละเอียดของกาแฟบดระดับปานกลาง (4) ใช้เครื่องชงกาแฟประเภท ชงผ่านผ่านกรอง (drip) ยี่ห้อ ELECTROLUX รุ่น ECM1303W ด้วยน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสในอัตราส่วนกาแฟบด 5 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร เพื่อใช้ในการทดสอบความชอบและการยอมรับด้วยการทดสอบชนิด 9-point Hedonic test ใช้ผู้ชิมจำนวน 19 คนที่รับประทานกาแฟดำเป็นประจำ วางแผนการทดสอบด้วยแผนการทดลองแบบบล็อคสุ่ม (RCBD) โดยกำหนดให้ผู้ชิมเป็นบล็อก เสิร์ฟตัวอย่างกาแฟอุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส จำนวน 30 มิลลิลิตร ต่อหนึ่งตัวอย่าง เก็บข้อมูล

คะแนนความชอบด้านกลิ่น สี รสชาติ และความชอบโดยรวมของกาแฟ และให้ผู้ทดสอบอธิบายคำจำกัดความรสชาติและกลิ่นของกาแฟที่สัมผัสได้โดยได้รับคำจำกัดความสำคัญ 6 คำคือ sourness bitterness sweetness roasty cocoa และ fruity

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความต่างของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรม IBM SPSS ver.26 ด้วย ANOVA ตามด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาสมในการอบแห้งเมล็ดกาแฟที่ผ่านการแวคคิวอัมอินฟิวชั่น

จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งเมล็ดกาแฟที่ผ่านกระบวนการแวคคิวอัมอินฟิวชั่นด้วยน้ำพบว่าการอบเมล็ดกาแฟในตู้อบลมร้อนที่ 45 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 180 นาทีเป็นต้นไปสามารถลดค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ลงได้ต่ำกว่า 0.75 (Table 1) และความชื้นต่ำกว่า 12.5% ทำให้เมล็ดกาแฟที่ได้มีคุณภาพอยู่ในระดับปลอดภัยจากการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และเป็นไปตามมาตรฐานสินค้าเกษตรของประเทศไทย มกศ. 5701-2561

ในการกระบวนการแวคคิวอัมอินฟิวชั่นของเมล็ดกาแฟดิบพบว่าสารละลายกรดอะซิติก, กรดอะซิติกผสมฟรุกโตส, ฟรุกโตส, ฟรุกโตสไซรัป, กลูโคส, ซูโครส, สารละลายจากกากสับปะรด และน้ำเป็นตัวอย่างควบคุมสามารถสังเกตเห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของตัวเมล็ดกาแฟหลังอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนได้คือตัวอย่างเมล็ดกาแฟที่ผ่านการแวคคิวอัมอินฟิวชั่นด้วยกรดอะซิติกผสมฟรุกโตส, ฟรุกโตส, ฟรุกโตสไซรัป, กลูโคส และ ซูโครส ผิวของเมล็ดกาแฟดิบมีความมันเงาของน้ำตาลเคลือบอยู่บนเมล็ด ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของกรดอะซิติกมีสีของเมล็ดกาแฟเป็นสีเขียวอ่อน ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่มีกรดอะซิติกมีสีเขียวคล้ำ

Table 1 Water activities of water treat coffee bean at different drying time.

Drying Time (minutes)	a_w
30	0.9273±0.0021
60	0.8612±0.0013
90	0.8466±0.0005
120	0.8545±0.0037
150	0.7802±0.0024
180	0.7309±0.0007
210	0.7236±0.0054

การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพเมล็ดกาแฟโรบัสต้า

จากการทดลองการปรับปรุงคุณภาพกาแฟโรบัสต้าด้วยสารละลาย 7 ชนิด (Table 2) พบว่าทุกตัวอย่างที่ผ่านการพรีทรีตเม้นมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ และปริมาณความชื้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสินค้าเกษตรของเมล็ด

กาแฟยกเว้นตัวอย่างกลูโคสไซรัปซึ่งมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ 0.7569±0.0025 เกินกำหนดอาจเป็นผลมาจากน้ำตาลกลูโคสเคลือบบนผิวเมล็ดกาแฟมากทำให้ความชื้นภายในเมล็ดใช้เวลาในการระเหยมากขึ้นจึงมีความชื้นสะสมส่งผลให้วอเตอร์แอคทิวิตี้ สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ เมื่อพิจารณาสีของเมล็ดกาแฟคั่วจากการวัดในหน่วย L* a* และ b* แล้วตัวอย่างที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกลูโคสไซรัป (Experiment 5) (Table 2) มีค่าความสว่างที่ต่ำกว่าตัวอย่างอะซิติกอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) เนื่องมาจากกรดอะซิติกมีคุณสมบัติในการฟอกสีซึ่งมีผลให้เมล็ดกาแฟดิบมีสีสว่างขึ้นก่อนการคั่วจึงส่งผลต่อค่า L* ในเมล็ดกาแฟหลังคั่วให้สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ ตัวอย่างเมล็ดกาแฟที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลซูโครส, กรดอะซิติกผสมฟรุกโตสไซรัป, ฟรุกโตสไซรัป, ฟรุกโตส (Experiment 2,3,4,7) (Table 2) มีแนวโน้มที่จะมีค่าความสว่างน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมของน้ำตาล ส่วนตัวอย่างควบคุม(น้ำกลั่น ((Experiment 8) มีค่าเฉลี่ยความสว่างที่สูงกว่าตัวอย่างที่มีส่วนประกอบของน้ำตาลแต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) ซึ่งการที่ตัวอย่างที่แช่ด้วยน้ำตาลมีสีน้ำตาลขึ้นกว่าอาจเป็นผลมาจากปริมาณน้ำตาลที่สูงขึ้นในเมล็ดกาแฟหลังการปรับปรุงคุณภาพส่งผลให้เมื่อได้รับความร้อนในระหว่างการคั่วทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดและปฏิกิริยา caramelization มากขึ้น เกิดสาร melanoidin ซึ่งเป็นสารสีน้ำตาลมากขึ้นทำให้เกิดสีน้ำตาลเข้ม (Wei and Tanokura, 2015) และเกิดลักษณะมีกลิ่นคั่วขึ้นในเมล็ดกาแฟ ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่มีการเพิ่มปริมาณน้ำตาล(ตัวอย่างควบคุม และตัวอย่างกรดอะซิติก) มีสีน้ำตาลอ่อน

Table 2 Properties of green coffee bean after pretreatment and color of roasted coffee bean.

Experiment	Factor Treatment	a_w	Moisture (%)	L*	a*	b*
1	Control (water)	0.7358±0.0016^{cd}	12.05±0.16^{bc}	28.59±2.54^{ab}	3.03±0.36^{d}	2.52±0.31^{d}
2	Fructose	0.7117±0.0027^{a}	12.03±0.16^{b}	27.65±2.97^{ab}	1.19±0.24^{a}	-0.16±0.19^{a}
3	Fructose syrup	0.7084±0.0013^{a}	11.52±0.11^{a}	26.78±2.96^{ab}	0.81±0.24^{a}	-0.25±0.19^{a}
4	Sucrose	0.7316±0.0031^{c}	12.28±0.11^{bc}	26.67±1.59^{ab}	0.83±0.17^{a}	-0.39±0.14^{a}
5	Glucose syrup	0.7569±0.0025^{e}	12.34±0.06^{c}	25.12±1.06^{a}	1.81±0.37^{b}	0.49±0.33^{b}
6	Acetic acid	0.7200±0.0029^{b}	11.49±0.16^{a}	31.85±3.57^{b}	2.56±0.54^{c}	2.26±0.70^{d}
7	Acetic acid and Fructose	0.7084±0.0005^{a}	11.99±0.14^{b}	26.05±1.97^{ab}	1.10±0.31^{a}	-0.10±0.32^{a}
8	Pineapple	0.7381±0.0009^{d}	12.25±0.11^{bc}	27.70±2.74^{ab}	2.04±0.30^{b}	1.14±0.45^{c}

$^{a\,b\,c\,d\,e}$ Different letters in column mean significant difference at (*p<0.05*)

เมื่อทดสอบความชอบและการยอมรับตัวอย่างเครื่องกาแฟดำทั้ง 8 ชนิด ด้วยวิธีการ hedonic กับผู้ทดสอบจำนวน 19 คน (Table 3) พบว่าคุณสมบัติในด้านของสี รสชาติ และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) เมื่อพิจารณาความแตกต่างด้วย Duncan's New Multiple range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในด้านสีพบว่าตัวอย่าง ฟรุกโตสและซูโครสได้รับคะแนนสูงสุดและแตกต่างจากตัวอย่างอื่นๆ (p<0.05) (Table 3) ตัวอย่างทั้งคู่มีความสัมพันธ์กันเมื่อพิจารณาจากค่า L*a*b* จะพบว่ามีค่า a* เฉลี่ยไม่ถึง 1 และมีค่า b* เป็นลบ ซึ่งค่าสีโทนนี้อาจเป็นที่นิยมในกลุ่มตัวอย่างผู้ทดสอบ ตัวอย่างที่แช่ด้วยสารละลายกลูโคสไซรัป, กรดอะซิติกผสมฟรุกโตส และ ฟรุกโตสไซรัปมีคะแนนความยอมรับด้านรสชาติที่สูงกว่าตัวอย่างควบคุม (p<0.05) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสลายตัวของน้ำตาลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ aliphatic acid

เช่น formic acetic glycolic และ lactic ซึ่งเป็นสารตั้งต้น (Sanz et al., 2002; Wei and Tanokura, 2015) ภายใต้สภาวะความร้อนสูงน้ำตาลซูโครส จะเกิดการสลายตัวเป็นกลูโคส และ ฟรุกโตส ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อไปเป็นสาร 1,2-Endiole และ 2,3-Endiole ตามลำดับ สารเหล่านี้เป็นสาร intermediate ในการ form ตัวของ aliphatic acid การสลายตัวของ sucrose ไปเป็น monomeric carbohydrate ทำให้เกิดสารประกอบ 5-Hydroxymethyl-2-furfural (HMF) และสารในกลุ่ม furfural ซึ่งเป็นสารตั้งต้น ของสารให้กลิ่นในกาแฟคั่ว นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลและกรดยังอาจทำให้เกิดสาร non-volatile อื่น ๆ ที่ส่งผลต่อรสชาติของกาแฟ (Wei and Tanokura, 2015) ตัวอย่างฟรุกโตสนั้นไม่มีความแตกต่างทางด้านรสชาติกับตัวอย่างควบคุม ($p>0.05$) เป็นไปได้ว่าเมื่อเทียบกับฟรุกโตสไซรัปที่ ฟรุกโตสไซรัปมีองค์ประกอบของกลูโคสอยู่ด้วยซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้รสชาติที่สัมผัสได้แตกต่างกัน ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าคุณสมบัติทางด้านกลิ่นของตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณความเข้มข้นของสารละลายพรีทรีตเม้นที่อาจต่ำเกินไป ปริมาณสารกลิ่นที่เกิดขึ้นจากการคั่วจึงอาจไม่มากพอ ส่งผลให้ผู้ชิม (n=19) ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ชัดเจน การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นสารละลายและจำนวนผู้ชิมอาจจะทำให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

จากคะแนนด้านกลิ่น รสชาติและความชอบโดยรวมสารละลายที่มีความเหมาะสมและเป็นไปได้ที่จะส่งเสริมให้คุณภาพของกาแฟโรบัสต้าดีขึ้นได้ คือตัวอย่างกาแฟที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายกลูโคสไซรัป, กรดอะซิติกผสมฟรุกโตส และ ฟรุกโตสไซรัป

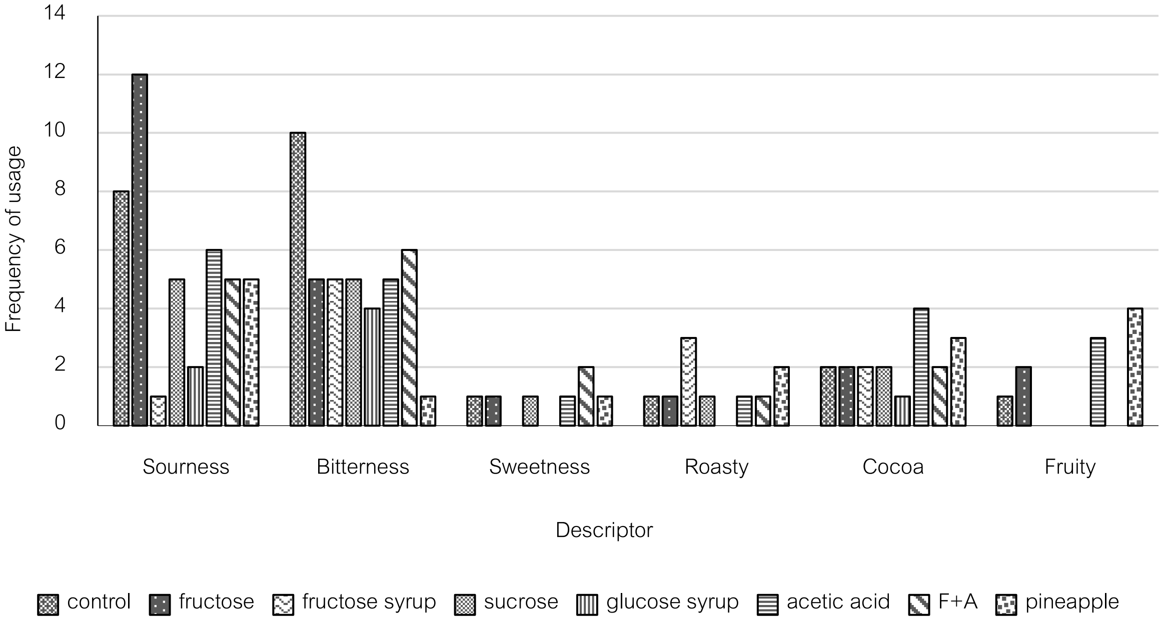
Table 3 Hedonic scores of coffee beverages prepared from roasted green bean treated with pretreatment solutions.

Experiment	Factor treatment	aroma	color	taste	overall
1	Control (water)	5.95±1.64 ^{a}	6.79±1.06 ^{bc}	4.21±1.73 ^{a}	5.11±1.65 ^{a}
2	Fructose	6.16±1.76 ^{a}	7.00±1.12 ^{c}	4.37±1.72 ^{ab}	5.68±1.45 ^{ab}
3	Fructose syrup	6.16±1.74 ^{a}	6.84±1.09 ^{bc}	5.63±2.06 ^{c}	6.00±1.65 ^{ab}
4	Sucrose	5.95±2.16 ^{a}	7.26±1.21 ^{c}	4.58±1.90 ^{abc}	5.16±1.84 ^{a}
5	Glucose syrup	6.63±1.22 ^{a}	6.21±1.32 ^{ab}	5.42±1.82 ^{bc}	6.63±1.45 ^{ab}
6	Acetic acid	5.89±1.92 ^{a}	6.32±1.38 ^{ab}	5.11±1.80 ^{abc}	5.32±1.69 ^{ab}
7	Acetic + Fructose	6.42±1.7 ^{a}	6.63±1.18 ^{bc}	5.58±1.87 ^{c}	6.26±1.62 ^{b}
8	Pineapple	5.89±1.74 ^{a}	5.95±1.36 ^{a}	4.89±1.89 ^{abc}	5.32±1.78 ^{ab}

$^{a\,b\,c}$ Different letters in column significant difference at (*p<0.05*)

ในการทดลองได้ให้ผู้ชิมระบุคำอธิบายลักษณะ (sensory descriptor) ของแต่ละตัวอย่างกาแฟ ผลการทดลองพบว่าคำที่ผู้ชิมบันทึกไว้มากที่สุด 6 คำแรก คือ ความเปรี้ยว (sourness), ความขม (bitterness), ความหวาน (sweetness), กลิ่นคั่ว (roasty), กลิ่นโกโก้ (cocoa), กลิ่นผลไม้ (fruity) เมื่อพิจารณาผลของความถี่ หรือ

จำนวนผู้ชิมที่ใช้ descriptor ทั้ง 6 นี้ (Figure 1) พบว่าตัวอย่างที่ผู้ชิมให้คำอธิบายว่ามีกลิ่น fruity คือตัวอย่างที่ใช้สารละลายกากสับปะรด กรดอะซิติก และฟรุกโตส ซึ่งได้รับคะแนนทางด้านกลิ่นที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม โดยอาจเป็นไปได้ว่ากลิ่นผลไม้ในตัวอย่างนี้เป็นกลิ่นที่กลุ่มผู้ไม่พึงประสงค์ในกาแฟ ในด้านรสชาติตัวอย่างที่มีความขมและความเปรี้ยวจะได้รับความยอมรับจากผู้ชิมสูง เมื่อพิจารณา descriptor ของผู้ทดสอบแล้วพบว่าตัวอย่างที่ได้รับคะแนนความชอบมากที่สุดทั้งสามตัวอย่างคือกาแฟปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลาย กลูโคสไซรัป มีความเปรี้ยว (2/19) และขม (4/19) กรดอะซิติกผสมฟรุกโตส มีความเปรี้ยว (5/19) ขม (6/19) มีความหวานในตัวกาแฟ (2/19) และ ฟรุกโตสไซรัป ซึ่งมีความเปรี้ยว (1/19) รสขม(5/19)และมีจำนวนผู้ชิมระบุว่ามีกลิ่นคั่วมากสุด (3/19) ซึ่งอาจเป็นคุณสมบัติของกาแฟที่นิยมในกลุ่มผู้ทดสอบ นอกจากนี้จะเห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพกาแฟด้วยน้ำตาลนั้นลด descriptor ในเรื่องความขมของกาแฟโดยทุกตัวอย่างมีจำนวนผู้ระบุว่ามีความขม น้อยกว่าตัวอย่างควบคุม (10/19) ในรสชาติเปรี้ยวจะเห็นว่าตัวอย่างที่ใช้ฟรุกโตส มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ชิมที่ระบุว่าตัวอย่างเปรี้ยว (12/19) เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (8/19) แต่ตัวอย่างกลูโคสไซรัป (2/19) และฟรุกโตสไซรัป (1/19)มีจำนวนผู้ชิมที่ระบุว่าตัวอย่างมีความเปรี้ยวลดลงจากตัวอย่างอื่นอย่างเห็นได้ชัด



*F+A = solution of acetic acid and fructose

Figure 1 Frequency of descriptor usage by panelists (n=19) to describe coffee beverages prepared from roasted green bean treated with pretreatment solutions.

สรุป

การปรับปรุงคุณภาพเมล็ดกาแฟโรบัสต้าดิบด้วยวิธีการพรีทรีตเม้นด้วยวิธีการแวคคิวอัมอินฟิวชั่นสารละลายน้ำตาลและกรด สามารถทำให้เครื่องดื่มกาแฟมีรสชาติที่เปลี่ยนแปลงไปจากกาแฟโรบัสต้าควบคุมได้อย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) และน้ำตาลต่างชนิดกันในความเข้มข้นที่เท่ากันส่งผลให้รสชาติ และสีของกาแฟที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) โดยจาก descriptor ของผู้ทดสอบพบว่าความรู้สึกเปรี้ยวของกาแฟมีความเปลี่ยนแปลงมากที่สุด (Figure 1) สารละลายน้ำตาลกลูโคสสามารถส่งผลส่งผลทำได้สีกาแฟคั่วที่เข้มขึ้น

กว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) เมื่อคั่วที่สภาวะเดียวกัน เครื่องดื่มที่เตรียมจากกาแฟดิบที่แช่ด้วยกลูโคสไซรัป ฟรุกโตสไซรัปและสารละลายกรดอะซิติกผสมฟรุกโตส ได้รับคะแนนทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่น สี รสชาติและความชอบโดยรวมสูงกว่าตัวอย่างควบคุม จึงเหมาะสมต่อการนำมาศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพต่อคุณสมบัติทางเคมีของเมล็ดกาแฟโรบัสต้าต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Fisk, I.D., A. Kettle, S. Hofmeister, A. Virdi and J.S. Kenny. 2012. Discrimination of roast and ground coffee aroma. **Flavour** 1: 14-23

Getachew, A.T. and B.S. Chun. 2019. Coffee flavor. **Encyclopedia of Food Chemistry**. 48-53

Liu, C. , N. Yang, Q. Yang, C. Ayed, R. Linforth and I.D. Fisk. 2019a. Enhancing Robusta coffee aroma by modifying flavour precursors in the green coffee bean. **Food Chemistry** 281: 8–17.

Liu, C., Q. Yang, R. Linforth, I.D. Fisk and N. Yang. 2019b. Modifying Robusta coffee aroma by green bean chemical pre-treatment. **Food Chemistry** 272: 251–57.

Sanz, C., L. Maeztu, M.J. Zapelena, J. Bello and C. Cid. 2002. Profiles of volatile compounds and sensory analysis of three blends of coffee: influence of different proportions of Arabica and Robusta and influence of roasting coffee with sugar. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 82: 840–847.

Wei, F., K. Furihata, M. Koda, F. Hu, T. Miyakawa and M. Tanokura. 2012. Roasting process of coffee beans as studied by nuclear magnetic resonance: time course of changes in composition. **Journal Agriculture and Food Chemistry** 60: 1005–1012.

Wei, F. and M. Tanokura. 2015. Chapter 10 - Chemical changes in the components of coffee beans during roasting. **In Coffee in Health and Disease Prevention.** 83–91. Academic Press. Cambridge, MS.

ผลของแป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า และสารปรับปรุงเนื้อสัมผัสต่อคุณภาพอาหารว่างชนิดแท่งอบกรอบจากฟักทอง

Effects of Corn Flour, Rice Flour and Texture Improver on the Quality of the Stick Crispy Snack from Pumpkin

ชฎาพร จันบำรุง[1] กมลวรรณ แจ้งชัด[1*] และ อนุวัตร แจ้งชัด[1]

Chadaporn Chanbamrung[1], Kamolwan Jangchud[1*] and Anuvat Jangchud[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้า ปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ และปริมาณเนยต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารว่างอบกรอบจากฟักทอง จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้าที่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก ต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่อปริมาณแป้งข้าวเจ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่น และความแข็งของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่คะแนนความชอบโดยรวมลดลง จากการศึกษาผลของปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ และเนยของสองอัตราส่วนของแป้งผสมต่ออิมัลซิไฟเออร์ (60:3 และ 60:60 โดยน้ำหนัก) และอัตราส่วนแป้งผสมต่อปริมาณเนย (60:7.5 และ 60:15 โดยน้ำหนัก) เพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ และเนย ทำให้ความหนาแน่น และความแข็งมีค่าลดลง ส่งผลให้คะแนนความชอบด้านความแข็ง และความชอบโดยรวมเพิ่มขึ้น อัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณแป้งผสมอิมัลซิไฟเออร์และเนยเท่ากับ 60:6:7.5 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 17.48 นิวตัน และได้รับคะแนนความชอบโดยรวมในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก (7.6)

ABSTRACT

The objectives of this research were to study the effects of ratios of corn flour to rice flour, emulsifier and butter content on the qualities of stick crispy snacks from pumpkin. The effect of the ratios of corn flour to rice flour at 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100 by weight on the qualities of product showed that increasing of rice flour content caused the true density and hardness of product increased but the overall liking score decreased. Two ratios of mixed flour to emulsifier content) 60:3 and 60:6 by weight) and the ratios of mixed flour to butter content (60:7.5 and 60:15 by weight) were investigated to improve the texture of products. Increasing of emulsifier and butter content caused the true density and hardness decreased resulting in the increase in the liking score of hardness and overall liking. The optimal ratio of mixed flour to emulsifier and butter content was 60:6:7.5 by weight. The hardness of the product was 17.84 N and overall liking score was moderately like to like very much (7.6).

Key words: Corn flour, rice flour, emulsifier, snack and pumpkin flour

* Corresponding author; e-mail address: fagikwj@ku.ac.th

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

อาหารขบเคี้ยว จัดเป็นอาหารว่าง หรืออาหารที่บริโภคในระหว่างมื้อหลัก ประกอบด้วย แป้ง น้ำตาล และไขมันที่ให้พลังงานสูง (เนตรนภิส, 2550) ซึ่งในปัจจุบันผู้บริโภคใส่ใจดูแลสุขภาพมากขึ้นทำให้ผู้ประกอบการพัฒนาผลิตภัณฑ์เสริมคุณค่าจากธัญชาติโดยเฉพาะ ฟักทอง ที่เป็นแหล่งของเบต้าแคโรทีน วิตามิน และแร่ธาตุต่างๆ เช่น วิตามินบี1 วิตามินบี2 วิตามินบี6 โพแทสเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก เป็นต้น (Que *et al*., 2008) อีกทั้งยังมีใยอาหารสูง ขนมขบเคี้ยวส่วนใหญ่มีวัตถุดิบหลักเป็นสตาร์ช หรือ แป้ง (İbanoğluetal, 2006) โดยมีกลูเตนเป็นโปรตีนที่พบมากในแป้งสาลี ซึ่งมีความสำคัญต่อโครงสร้างของขนมขบเคี้ยว (Ashwini *et al*., 2004) และความกรอบของผลิตภัณฑ์มีความสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Tunick *et al*., 2013) ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากกลูเตน โดยใช้แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพดจึงต้องการโครงสร้างเพื่อทดแทนกลูเตนโดยการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ที่มีบทบาทช่วยเพิ่มความหนืด และการดูดซึมน้ำของก้อนโดทำให้เกิดการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบ อีกทั้งยังทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้ช้าลง (Lazaridou *et al*., 2007) เช่น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิล และแซนแทนกัม อีกทั้งยังสามารถทำให้เกิดโครงสร้างทดแทนกลูเตนได้ (Hablik, 2012) สำหรับอิมัลซิไฟเออร์ ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัส โดยลดความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ เช่น โมโนเอซิลกลีเซอรอล ไดเอซิลกลีเซอรอล และเลซิทิน เป็นต้น (ปาริฉัตร, 2555) อาหารขบเคี้ยวพองกรอบที่ปราศจากกลูเตน จึงต้องการส่วนผสมที่มาช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสให้ยังคงความพองและกรอบ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของแป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด อิมัลซิไฟเออร์ และเนยสำหรับการผลิตอาหารว่างชนิดแท่งอบกรอบจากฟักทอง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียม และวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบ

1.1. การเตรียมตัวอย่างฟักทองผง

นำฟักทองสดล้างทำความสะอาด และปลอกเปลือก จากนั้นหั่นฟักทองให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว นำไปนึ่งที่อุณหภูมิน้ำ 100 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที นำฟักทองที่นึ่งแล้วไปปั่นให้เนื้อละเอียดขึ้นโดยเครื่องปั่นอาหาร ความเร็วที่เบอร์ 1 ปั่นนาน 1 นาที มีค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (Total soluble soluble; TSS) เท่ากับ 11.2 องศาบริกซ์ แล้วนำไปเข้าเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ ที่อุณหภูมิ 115±2 องศาเซลเซียส ความดัน 20 ปาสคาล ความเร็วรอบที่ 55 วินาทีต่อรอบการหมุน จากนั้นนำฟักทองที่อบแห้งไปบดละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาด 60 เมซ นำมาบรรจุในถุงอลูมิเนียมเคลือบพลาสติก และวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

1.1.1 คุณภาพทางเคมี วิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธีการของ AOAC (2000) ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (water activity) วัดด้วยเครื่องยี่ห้อ Aqua lab รุ่น CX3 TE เตรียมตัวอย่างให้เป็นในรูปแบบผง โดยวัดค่า 3 ซ้ำ

1.1.2 คุณภาพทางกายภาพ วัดค่าสีระบบ CIE L*a*b* บันทึกค่า L*, a* และb*โดยใช้เครื่องวัดค่าสี สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Minolta รุ่น CM-3500d โดยวัดค่า 3 ซ้ำ

1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสของแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพด ตามวิธีการของ Juliano (1971) วัดค่า 3 ซ้ำ

2. การศึกษาอัตราส่วนของแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้าที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ชนิดของแป้งมีผลต่อคุณภาพของอาหารว่าง โดยเฉพาะทางด้านเนื้อสัมผัส (ความกรอบ) จึงทำการศึกษาเพื่อหาปริมาณแป้งที่เหมาะสมในแต่ละชนิด โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้า ที่มีผลต่อคุณภาพอาหารว่างอบกรอบโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ อัตราส่วนแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้าเท่ากับ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณแป้งทั้ง 2 ชนิดรวมกันเท่ากับร้อยละ 48 จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า ปริมาณฟักทองผงที่สามารถใช้ได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 50 ของแป้งผสมทั้งหมด และมีไฮโดรคอลลอยด์ เนย และเกลือ รวมร้อยละ 100 โดยน้ำหนักแห้ง มีปริมาณของแห้งต่อน้ำเท่ากับ 30:70 โดยมีปริมาณความชื้นของโดก่อนอบร้อยละ 68±2 เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์หลังอบ กรรมวิธีในการผลิต โดยนำส่วนผสมมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันจนเป็นก้อนโด จากนั้นนำก้อนโดมาคลึงเป็นแผ่นให้มีความหนาของแผ่นเท่ากับ 0.5 เซนติเมตรและนำไปแช่แข็ง ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นแท่งสี่เหลี่ยม มีขนาด 0.5x0.7x5.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร วางบนถาดอบโดยมีระยะห่างระหว่างชิ้นเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร แล้วนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิสูง 140±5 องศาเซลเซียส นาน 25 นาที และอบต่อที่อุณหภูมิต่ำ 90±5 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ได้อาหารว่างอบกรอบ โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ แล้วนำมาวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

2.1 คุณภาพทางเคมี วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (2000) วัดค่า 3 ซ้ำ ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ ตามวิธีการข้อที่ 1.1.1

2.2 คุณภาพทางกายภาพ วัดค่าสีระบบ CIE L*a*b* ตามวิธีการข้อที่ 1.1.2 ค่าเนื้อสัมผัส โดยวัดค่าความแข็ง ด้วยเครื่องวัดค่าเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) รุ่น TA.X.T plus ยี่ห้อ Stable Micro System โดยใช้หัวกด HDP/BS (Warner bratzler blade set with rectangular slot blade) สภาวะที่ใช้ คือ ความเร็วหัวกดก่อนวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร/นาที ความเร็วหัวกดขณะวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร/นาที ความเร็วหัวกดหลังจากการวัดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร/นาที โดยทำการวัดค่า 20 ซ้ำ และค่าความหนาแน่นจริง (True density) โดยดัดแปลงจากวิธีการของ AACC (2000) วัดปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่ไม่รวมรูพรุน โดยวิธีการแทนที่ด้วยเมล็ดงาขาว วัดค่า 5 ซ้ำ คำนวณจากค่าความหนาแน่นจริงจากน้ำหนักผลิตภัณฑ์หลังอบ (กรัม) หารด้วยปริมาตรของผลิตภัณฑ์หลังอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีการให้คะแนนความชอบ (9-point hedonic scale) โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

3. การศึกษาปริมาณอิมัลซิไฟเออร์และปริมาณเนยที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาในข้อที่ 2 อัตราส่วนแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้าที่เหมาะสมเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนักมาทำการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ (ซึ่งเป็นสารผสมของ โมโนเอซิลกลีเซอรอล และไดเอซิลกลีเซอรอล) และปริมาณเนย ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยจัดสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล 2x2 ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ปัจจัยที่ 1 คือ อัตราส่วนแป้งผสม (แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า และฟักทองผง) ต่ออิมัลซิไฟเออร์ 2 ระดับ คือ 60:3 และ 60:6 โดยน้ำหนัก และปัจจัยที่ 2 คือ อัตราส่วนแป้งผสมต่อปริมาณเนย 2 ระดับ คือ 60:7.5 และ 60:15 โดยน้ำหนัก และส่วนประกอบอื่น ๆ คงที่ กรรมวิธีผลิตตามการศึกษาข้อที่ 2 โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ และนำผลิตภัณฑ์มาวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

3.1 คุณภาพทางเคมี วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (2000) และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้

(water activity) ตามวิธีการข้อที่ 1.1.1

3.2 คุณภาพทางกายภาพ วัดค่าสีระบบ CIE L*a*b* ตามวิธีการข้อที่ 1.1.2 วัดค่าเนื้อสัมผัสโดยวัดค่าความแข็ง (hardness) และค่าความหนาแน่นจริง (True density) ตามวิธีการข้อที่ 2.2

3.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัส ตามวิธีการข้อที่ 2.3

4.การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ANOVA ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS For window 12 version (SPSS Thailand Co., Ltd.) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 และทดสอบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's multiple-range test (DMRT

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. คุณภาพวัตถุดิบ

ฟักทองผงจากการสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่า มีสีเหลืองออกแดงเล็กน้อย เมื่อนำมาวัดค่าสี พบว่า มีความสว่างค่อนข้างมาก โดยมีค่าสีความสว่าง (L*), ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 73.76 ,6.78 และ 56.69 ตามลำดับ ฟักทองผงมีความชื้นร้อยละ 3.29 และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ เท่ากับ 0.35 จากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณแอมิโลสในแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพดเท่ากับร้อยละ 25.85 และ 20.15 ตามลำดับ

2. การศึกษาอัตราส่วนของแป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้าที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาอัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวโพดกับแป้งข้าวเจ้า พบว่า ปริมาณแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้าที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้ค่าสี L*, a* และ b* ของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) เมื่อปริมาณแป้งข้าวเจ้ามากขึ้นผลิตภัณฑ์ขยายตัวได้น้อยลงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นเนื้อมากขึ้น ส่งผลให้ความสว่างลดลง โดยมีค่า L*อยู่ในช่วง 49.65-52.7 ค่า a* อยู่ในช่วง 10.39-12.89 และ ค่า b* อยู่ในช่วง 47.16-54.20 จากการวัดค่าความแข็ง และความหนาแน่น พบว่า เมื่อมีปริมาณแป้งข้าวเจ้าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่น และความแข็งของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) โดยอัตราส่วนแป้งข้าวโพดกับแป้งข้าวเจ้าที่ 0:100 โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งมากที่สุดเท่ากับ 28.07 นิวตัน ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์อาจเกิดจากองค์ประกอบของแป้ง โดยเฉพาะปริมาณแอมิโลแพคติน และแอมิโลสที่แตกต่างกัน เมื่อปริมาณแป้งข้าวโพดเพิ่มมากขึ้นทำให้การขยายตัวสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแป้งข้าวโพดมีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า จากการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสของแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพดเท่ากับร้อยละ 25.85 และ 20.15 ตามลำดับ Jomduang and Mohamed (1994) จากรายงานพบว่าในแป้งข้าวโพดมีปริมาณแอมิโลแพคตินสูงจะทำให้การขยายตัวของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นต่ำ แรงที่ใช้ในการทำให้ผลิตภัณฑ์แตกหักของผลิตภัณฑ์จึงต่ำลง ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเจ้าทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่าความชื้นของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วงร้อยละ 3.84-4.27 และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้อยู่ในช่วงเท่ากับ 0.32-0.38 ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Color, hardness, water activity and moisture content of product .

Quality		Corn flour to rice flourratio				
		100:0	75:25	50:50	25:75	0:100
Color	L*	52.75±0.46^{a}	52.02±0.22^{c}	51.69±0.05^{d}	52.26±0.05^{b}	49.65±0.03^{c}
	a*	10.39±0.17^{d}	12.00±0.08^{c}	11.84±0.19^{c}	12.89±0.13^{a}	12.50±0.41^{b}
	b*	50.12±0.77^{b}	49.14±0.52^{c}	48.58±0.42^{d}	54.20±0.41^{a}	47.16±0.45^{e}
Hardness (N)		16.40±4.27^{d}	20.20±4.18^{c}	20.88±4.13^{bc}	23.63±3.00^{b}	28.07±4.34^{a}
True density (g/cm^3)		0.14±0.01^{d}	0.16±0.02^{d}	0.24±0.01^{c}	0.27±0.02^{b}	0.38±0.03^{a}
Water activity		0.32±0.02^{c}	0.42±0.03^{a}	0.42±0.03^{ab}	0.37±0.01^{b}	0.38±0.02^{b}
Moisture content (%)		4.27±0.12^{a}	4.05±0.06^{b}	3.84±0.05^{c}	3.94±0.01^{bc}	4.22±0.05^{a}

Note $^{a-e}$ Means with different letters within the same row are significantly different (*p*≤0.05)

Table 2 Sensory evaluation of stick crispy snack from pumpkin.

Attribute	Corn flour to rice flour ratio				
	100:0	75:25	50:50	25:75	0:100
Appearance	7.5±0.8^{a}	7.2±0.8^{a}	7.5±0.7^{a}	7.4±0.8^{a}	6.0±1.5^{b}
Overall odor^{ns}	7.3±0.7	7.0±0.9	7.2±0.8	7.1±1.0	6.7±0.9
Butter flavor^{ns}	7.0±0.9	6.9±0.9	7.1±0.9	6.8±1.2	6.5±1.0
Pumpkin flavor^{ns}	7.0±0.9	7.0±0.9	6.8±1.3	6.8±1.2	6.6±1.4
Salty^{ns}	7.0±0.8	7.0±1.0	7.2±0.7	7.1±0.7	7.1±0.7
Hardness	7.1±0.8^{a}	6.8±1.5^{a}	7.4±1.0^{a}	7.2±0.8^{a}	5.8±1.5^{b}
Overall liking	7.0±0.8^{b}	6.8±1.5^{b}	7.6±0.7^{a}	7.0±0.8^{b}	6.1±1.3^{c}

Note $^{a-c}$ Means with different letters within the same row are significantly different (*p*≤0.05)

^{ns} Not significant (p>0.05)

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า อัตราส่วนของแป้งที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อค่าคะแนนความชอบด้านกลิ่นโดยรวม กลิ่นรสเนย กลิ่นรสฟักทอง และรสเค็ม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) แต่มีผลต่อคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ ความแข็ง และความชอบโดยรวม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ(p≤0.05) เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเจ้าทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น (Table 1) ส่งผลให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ ความแข็ง และความชอบโดยรวมลดลง โดยมีคะแนนน้อยที่สุดที่อัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้าเท่ากับ 0:100 โดยน้ำหนัก และพบว่าอัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้าที่เหมาะสมเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก และมีคะแนนความชอบด้านความแข็ง และความชอบโดยรวมมากที่สุด ดังแสดงใน Table 2

3 .การศึกษาปริมาณอิมัลซิไฟเออร์และปริมาณเนยที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ และปริมาณเนย พบว่ามีอิทธิพลต่อคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ในค่าสี L*,a*,b* ค่าความแข็ง ค่าความหนาแน่น ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ และปริมาณความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05) ดังแสดงใน Table 3 โดยมีปฏิสัมพันธ์ต่อค่าสี L*, a* และค่าความแข็ง การเพิ่มขึ้น

ของปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ และเนย ส่งผลให้ค่า L* เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า a* และ b* ลดลง และทำให้ค่าความหนาแน่น และค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากในการตีส่วนผสมด้วยเครื่องผสมอาหาร ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กลง โดยไขมันจะไปล้อมรอบฟองอากาศอีกทั้งอิมัลซิไฟเออร์ช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างผิวของของเหลวกับอากาศ นอกจากนี้แป้งที่กระจายตัวอยู่รอบฟองอากาศเมื่อได้รับความร้อนจึงเกิดการเจลาทิไนซ์และทำหน้าที่ในการอุ้มฟองอากาศขนาดเล็ก เพื่อป้องกันไม่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ จึงทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กมีความเสถียรมากขึ้น (ปาริฉัตร, 2555 ; Manley, 2011) ด้วยเหตุผลนี้สังเกตได้ว่าในภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์มีรูพรุนซึ่งเกิดจากฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากเรียงตัวติดกันบริเวณขอบของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงใน Figure 1C ผนังของรูพรุนมีความบางทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเปราะมาก แรงที่ใช้ในการทำให้แตกหักของผลิตภัณฑ์จึงต่ำลง ทำให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ลดลง ผลิตภัณฑ์มีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้อยู่ในช่วง 0.21-0.35 และปริมาณความชื้นหลังอบอยู่ในช่วงร้อยละ 3.66-3.95

Table 3 Color, hardness, water activity and moisture content of product .

Quality		Mixed flour to emulsifierratio	Mixed flour with butterratio 60:7.5	Mixed flour with butterratio 60:15
Color	L*	60:3	55.81±0.06^{c}	56.18±0.55^{b}
		60:6	56.34±0.09^{b}	61.12±0.03^{a}
	a*	60:3	9.61±0.03^{a}	8.86±0.16^{b}
		60:6	8.53±0.02^{c}	7.91±0.02^{d}
	b*	60:3	46.61±0.05^{b}	47.42±0.84^{a}
		60:6	45.43±0.05^{d}	46.17±0.04^{c}
Hardness (N)		60:3	22.28±1.27^{a}	18.97±1.58^{b}
		60:6	17.84±2.09^{bc}	16.94±1.01^{c}
True density (g/cm^3)		60:3	0.26±0.06^{a}	0.15±0.01^{b}
		60:6	0.19±0.02^{ab}	0.13±0.01^{b}
Water activity		60:3	0.23±0.01^{b}	0.35±0.01^{a}
		60:6	0.21±0.02^{c}	0.34±0.01^{a}
Moisture content (%)		60:3	3.66±0.07^{c}	3.84±0.06^{ab}
		60:6	3.75±0.06^{bc}	3.95±0.01^{a}

Note $^{a-d}$ Means with different letters within the same quality are significantly different ($p \leq 0.05$)

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าการเพิ่มปริมาณแป้งผสมต่ออิมัลซิไฟเออร์ และเนยไม่มีผลต่อคะแนนความชอบด้านกลิ่นโดยรวม กลิ่นรสเนย กลิ่นรสฟักทอง และรสเค็มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอิมัลซิไฟเออร์มีผลทำให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ ความแข็ง และความชอบโดยรวมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งที่ลดลงที่ปริมาณเนยเพิ่มขึ้นมีผลทำให้คะแนนความชอบด้านความแข็งเพิ่มขึ้นในปริมาณอิมัลซิไฟเออร์เท่ากับ 60:6 โดยน้ำหนักอย่าง

มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณแป้งผสมต่ออิมัลซิไฟเออร์เท่ากับ 60:6 เนยเท่ากับ 60:7.5 โดยน้ำหนักที่มีคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ ความแข็ง และความชอบโดยรวมมากที่สุด ดังแสดงใน Table 4 ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมของแป้งผสมต่ออิมัลซิไฟเออร์ และเนยเท่ากับ 60:6:7.5 โดยน้ำหนักเนื่องจากปริมาณเนยที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อคะแนนความชอบจึงเลือกปริมาณเนยที่น้อยกว่าเพราะมีปริมาณไขมันและต้นทุนที่ต่ำกว่า

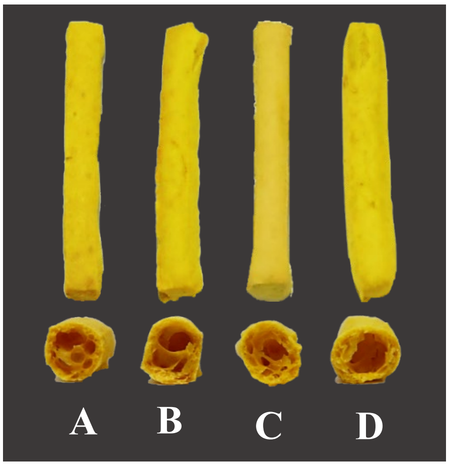


Figure 1 Stick crispy snack from pumpkin at different ratios of mixed flour, emulsifier and butter 60:3:7.5 (A), 60:3:15 (B), 60:6:7.5 (C) and 60:6:15 (D).

Table 4 Sensory evaluation of stick crispy snack from pumpkin

Attribute	Ratio of mixed flour with emulsifier	Ratio of mixed flour with butter	
		60:7.5	60:15
Appearance	60:3	6.6±0.9[b]	6.8±0.9[b]
	60:6	7.8±0.5[a]	7.7±0.7[a]
Overall odor[ns]	60:3	6.9±0.7	6.8±0.9
	60:6	7.5±0.6	7.3±0.8
Butter flavor[ns]	60:3	6.6±1.1	6.7±1.1
	60:6	6.2±1.2	6.8±0.8
Pumpkin flavor[ns]	60:3	6.9±0.8	7.2±0.7
	60:6	7.3±0.7	7.3±0.8
Salty[ns]	60:3	7.1±0.9	7.4±0.7
	60:6	7.3±0.5	7.2±0.7
Hardness	60:3	6.4±1.3[c]	7.1±0.8[b]
	60:6	7.7±0.4[a]	7.6±0.8[a]
Overall liking	60:3	6.5±1.2[b]	6.9±1.2[b]
	60:6	7.6±0.6[a]	7.7±0.9[a]

Note [a-c] Means with different letters within the same column and row are significantly different ($p \leq 0.05$)

[ns] Not significant ($p > 0.05$)

สรุป

จากการศึกษาอัตราส่วนระหว่างปริมาณแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้า พบว่าเมื่อปริมาณแป้งข้าวเจ้าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่น และความแข็งของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คะแนนความชอบลดลง อัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้าที่เหมาะสมคือ 50:50 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ และเนยเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ความหนาแน่น และความแข็งของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังนั้นในการผลิตอาหารว่างชนิดแท่งอบกรอบจากฟักทอง พบว่ามีปริมาณแป้งผสมต่ออิมัลซิไฟเออร์และปริมาณเนยที่เหมาะสมเท่ากับ 60:6:7.5 โดยน้ำหนัก

เอกสารอ้างอิง

ชญานิศ คล่องแคล่ว. 2561. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชนิดกรอบพองจากข้าวเจ้าเสริมน้ำหมึกผงจากหมึกกล้วย**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยบูรพา.

เนตรนภิส วัฒนสุชาติ. 2547. การพัฒนาเฟรนช์ฟรายจากมันสาปะหลังบดเสริมแคลเซียม. **อาหาร** 34(2): หน้า 106-109.

ปาริฉัตร หงสประภาศ. 2555 .**ระบบคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์**. ธนาเพลส, กรุงเทพฯ.

AACC. 2000. **American Association of Cereal Chemists** 8th St. Paul, USA.

AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis** 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlingtion, USA.

Ashwini, A., R. Jyotsna and D. Indrani. 2009 .Effect of hydrocolloids and emulsifiers on the rheological, microstructural and quality characteristics of eggless cake. **Food Hydrocolloids** 23: 700-707.

Jomduang, S. and S. Mohamed. 1994. Effect of amylose/amylopectin content, milling methods, particle size, sugar, Salt and oil on the puffed product characteristics of a traditional thai rice-based snack food (khao kriap waue). **Journal of the Science of Food and Agriculture** 65: 85-93.

Juliano, B.O. 1971. Simplified assay for milled-rice amylose. **Cereal Science Today** 16: 334-338.

Lazaridou A., D. Duta, M. Papageorgiou N. Belc. and C.G. Biliaderis. 2007 .Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. **Journal of Food Engineering** 79: 1033-1047.

Manley, D. 2011. **Manley's Technology of Biscuits, Crackers and Cookies**. 4 .woodhead, USA.

Que, F., L. Mao, X. Fang, and T. Wu. 2008 .Comparison of hot air- drying and freeze-drying on the physicochemical properties and antioxidant activities of pumpkin (Cucurbitamoschata Duch.) flours. **Food Science and Technology** 43: 1195–1201.

Tunick, M.H., C.I. Onwulata, A.E. Thomas, J.G. Phillips, S. Mukhopadhyay, S. Sheen, C.-K. Liu, N. Latona, M.R. Pimentel and P.H. Cooke. 2013. Critical evaluation of crispy and crunchy textures: a review. **International Journal of Food Properties** 16: 949–963.

Hablik, G. 2012. Xanthan, pp. 221-229. *In* M. Moeller and K. Matyjaszewski, eds. **Polymer Science: A Comprehensive Reference.** Elsevier Science and Technology, Netherland.

การวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่าของผลิตภัณฑ์หนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (โอทอป): กรณีศึกษา ผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูป

The Value Chain Analysis of One Tambon One Product (OTOP): Case Study in Processed Fruit Product

บัณฑิต อินณวงศ์[1*] ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์[2] กนกวรรณ กิ่งผดุง[1] นารีนาถ พวงจีน[1] และ จารุวรรณ มารุจกล้า[1]

Bhundit Innawong[1*], Pramuk Parakulsuksatid[2], Kanokwan Kingpadung[1], Nareenat Phuangcheen[1] and Jaruwan Marudkla[1]

บทคัดย่อ

ห่วงโซ่อุปทานผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัตถุดิบเกษตรของไทยแบบเดิม ประกอบด้วย 3 ห่วงโซ่ย่อย คือ การปลูก/การผลิต/การตลาด และมีรูปแบบ linear cooperation รายได้ไม่สามารถกระจายถึงเกษตรกร ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาการคลี่ภาพร้อยละสัดส่วนรายได้ของผลิตภัณฑ์ OTOP กรณีศึกษา ผลไม้แปรรูป คือ ลำไย ทุเรียน มังคุด เงาะ และสับปะรด โดยการวิเคราะห์ร้อยละสัดส่วนรายได้ด้วยวิธี Multi-Criteria Performance Measurement/Analysis Technique (MCPMT) จากผลการวิเคราะห์พบว่า ผู้ขายมีร้อยละสัดส่วนรายได้มากที่สุดของห่วงโซ่อุปทาน คือ ร้อยละ 46.85 รองลงมาคือ ผู้แปรรูป ร้อยละ 34.37 เกษตรกร ร้อยละ 11.78 และผู้รวบรวม ร้อยละ 7 จากผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า เกษตรกรมีร้อยละสัดส่วนรายได้ค่อนข้างต่ำในห่วงโซ่อุปทาน ซึ่งแนวทางการช่วยส่งเสริมให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มสูงขึ้น คือ การเพิ่มบทบาทในห่วงโซ่อุปทานให้เกษตรกรเป็นผู้รวบรวม และ/หรือเป็นผู้แปรรูปขั้นต้นได้สามารถเพิ่มสัดส่วนแบ่งรายได้ให้สูงขึ้นถึงร้อยละ 26

ABSTRACT

The traditional product / product supply chain from Thai agricultural raw materials is highly unique, consisting of 3 sub-chains, planting / processing/ marketing and having linear cooperation forms. Income cannot be distributed to farmers. Therefore, in this research project focus on the study the percentage of value chain about OTOP products income; in the case of processed fruits such as longan, durian, mangosteen, rambutan and pineapple. Analyzing the percentage of income proportion is processed by Multi-Criteria Performance Measurement / Analysis Technique (MCPMT). From the analyzation, the salesmen have the highest proportion of revenue from the supply chain, which is 46.85%, followed by the 34.37% of the processors, 11.78% of the farmers and 7% of the collectors. The results of the analysis show that farmers have a relatively low percentage of the supply chain income. In which to help farmers increase their incomes, the operational approach is increasing the role in the supply chain by allowing farmers to be collectors and/or improving to primary processor which can increase the proportion of revenue to be higher up to 26 percent.

Key words: Value chain, OTOP, Processed Fruit Product, MCPMT

* Corresponding author; e-mail address: b_innawong@yahoo.com

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

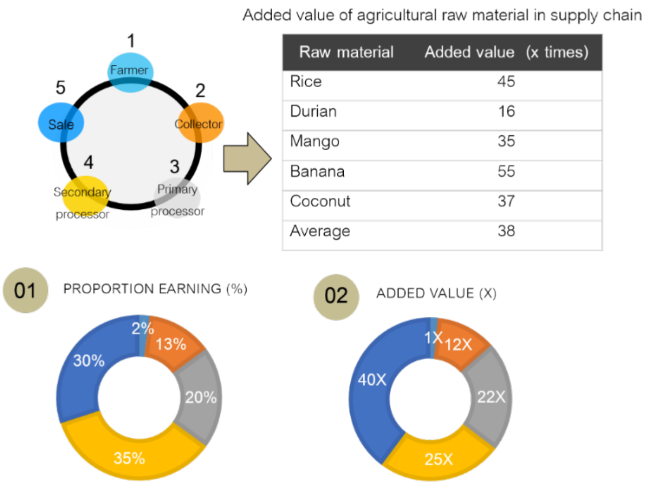
[1]Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Phatom 73000

[2]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ห่วงโซ่อุปทานสินค้า/ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัตถุดิบเกษตรของไทยแบบเดิมมีลักษณะเฉพาะตัวสูง ประกอบด้วย 3 ห่วงโซ่ย่อย คือ การปลูก/การผลิต(แปรรูป)สินค้า/การตลาด (ปิยาภรณ์, 2558) เกิดการร้อยต่อวิถีทำงานเชื่อมกันตั้งแต่ต้นน้ำที่เริ่มจาก เกษตรกร-ผู้รวบรวม-ผู้รับจ้างผลิต-ผู้ผลิต(แปรรูป)สินค้า-ผู้ขาย หากพิจารณาอย่างรอบด้านจะพบว่า ห่วงโซ่อุปทานสินค้า/ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัตถุดิบเกษตรของไทยแบบเดิมที่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linear cooperation) รายได้ส่วนใหญ่จะกระจุกตัวอยู่ที่คนกลุ่มน้อย (ผู้รวบรวม-ผู้รับจ้างผลิต-ผู้ผลิต(แปรรูป)สินค้า-ผู้ขาย) แต่ไม่สามารถกระจายตัวลงไปถึงตัวเกษตรกรซึ่งเป็นคนส่วนใหญ่ รายงานการวิจัยของบัณฑิต และคณะ (2558) ที่วิเคราะห์มูลค่าเพิ่มของวัตถุดิบการเกษตรผ่านห่วงโซ่การตลาดจาก Network value chain ของผู้ประกอบการ SME พบว่าเกษตรกรผู้ปลูก (คนส่วนใหญ่ของห่วงโซ่อุปทาน) กลับมีสัดส่วนรายได้จากการขายผลิตภัณฑ์ในรูปแบบเดิมเพียงร้อยละ 2 เท่านั้น (Figure 1) และไม่ว่าจะขายผลิตภัณฑ์ได้มากหรือน้อยเพียงใดก็ตาม ห่วงโซ่อุปทานแบบ linear cooperation ไม่ได้มีผลต่อรายได้ของเกษตรกรแต่อย่างใด โดยรายได้นั้นไม่ได้มีมากขึ้นตามผลิตภัณฑ์ที่ขายได้เพิ่มขึ้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกร อีกทั้งตัวเกษตรกรก็ยังไม่มีการทำงานในสิ่งที่ตนถนัดและทำได้ดี (turnkey) และไม่ได้คำนึงที่จะทำเฉพาะในสิ่งที่ตนเองถนัดให้เก่งและดีเสียก่อน



Raw material	Added value (x times)
Rice	45
Durian	16
Mango	35
Banana	55
Coconut	37
Average	38

Figure 1 The proportion earning and added value of agricultural raw material.

Resource: Bhundit *et al.* (2015)

โครงการหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (One Tambon One Product; OTOP) ได้จัดตั้งเพื่อส่งเสริมการกระจายรายได้สู่ชุมชน และลดปัญหาการละทิ้งถิ่นฐานเดิมของกลุ่มเกษตรกร รวมถึงช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตให้กับเกษตรกร (ปิยะฉัตรและจีรีพร, 2560) แต่เมื่อพิจารณา ณ ปัจจุบัน พบว่าการจัดตั้งดังกล่าวไม่ได้ตอบโจทย์แนวคิดเริ่มต้นอีกต่อไป เพราะถึงแม้ว่าในปี 2560 พบว่ายอดจำหน่ายสินค้า OTOP ไทย สามารถมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ถึง 138,000 ล้านบาท (ปิยะวัฒน์, 2562) หากแต่เสียงสะท้อนจากคนในชุมชนพบว่า สินค้า OTOP

นั้นไม่ได้สร้างรายได้ให้กับเกษตรกรรากหญ้าอย่างที่ตั้งเป้าหมายไว้ จึงส่งผลให้เกิดคำถามที่ว่า *"ยอดขาย OTOP สูง แต่ทำไม? รายได้กลับไม่กระจายถึงฐานราก (เกษตรกร)"* เพื่อค้นหาแนวทางการแก้ไขสถานการณ์/ปัญหาของ OTOP ซึ่งจะเนื่องไปถึงเกษตรกรนั้นจำเป็นจะต้องวิเคราะห์ห่วงโซ่อุปทาน กางและคลี่ภาพผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (Stakeholders) และสัดส่วนการกระจายรายได้ที่เกิดขึ้นในห่วงโซ่อุปทานนั้นๆ เพื่อให้เห็นและเข้าใจสภาวการณ์ที่แท้จริงอย่างถ่องแท้ก่อนปฏิบัติการหรือวางแผนจัดการให้เกิดกลไกที่จะหนุนเสริมหรือสนับสนุนให้เกษตรกรที่เกี่ยวข้องในผลิตภัณฑ์ OTOP นั้น ได้ส่วนแบ่งและการกระจายรายได้ที่เป็นธรรม อันจะนำไปสู่การเกิดระบบใหม่ที่สามารถส่งเสริมและลดแรงต้านที่ก่อเกิดปัญหาในปัจจุบัน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการคลี่ภาพห่วงโซ่อุปทานของผลิตภัณฑ์ OTOP ในกรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูป (ลำไย ทุเรียน มังคุด เงาะ และสับปะรด) เพื่อวิเคราะห์/สังเคราะห์มูลค่าเพิ่ม โครงสร้างการกระจายรายได้ และสัดส่วนแบ่งรายได้ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในห่วงโซ่อุปทานผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูป ใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับตัดสินใจ (data decision) ให้ทั้งกลุ่มผู้ประกอบการ เกษตรกร และภาครัฐต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. รวบรวมข้อมูลผลิตภัณฑ์ OTOP ในกลุ่มผลไม้แปรรูป จากฐานข้อมูลเว็บไซต์ www.thaitambon.com และฐานข้อมูลของกรมพัฒนาชุมชนกระทรวงมหาดไทย (ข้อมูลปรับปรุงเมื่อวันที่ 20 กันยายน 2561 ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน และ OTOP ภายในประเทศไทย) โดยทำการรวบรวมของผู้ประกอบการ OTOP และข้อมูลของผลิตภัณฑ์ OTOP นอกจากนี้เก็บข้อมูลราคาขายวัตถุดิบจากการสืบค้นข้อมูลจากสำผู้งาเศรษฐกิจการเกษตร

2. วิเคราะห์ข้อมูลปฐมภูมิที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูปของผลิตภัณฑ์ OTOP เพื่อสร้างชุดข้อมูลทุติยภูมิ โดยแบ่งตามผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้อง 4 ภาคี ได้แก่ เกษตรกร ผู้รวบรวม ผู้แปรรูป และผู้ขาย

3. การสร้างข้อมูลทุติยภูมิด้วยการวิเคราะห์ร้อยละสัดส่วนแบ่งรายได้ ด้วยวิธี Multi-Criteria Performance Measurement/Analysis Technique (MCPMT) (Phusavat, 2013) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แนวโน้มภาพรวมของดัชนี โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1 เลือกระดับ Scale ที่เหมาะสมของดัชนีราคาขาย (บาท) ซึ่ง Scale นี้อาจจะเลือกได้ 0 – 100 โดยที่ในแต่ละดัชนีราคาขายต้องมี Scale ที่เหมือนกัน

3.2 กำหนดค่าต่ำสุด ค่าที่ยอมรับได้ และค่าสูงสุด ของแต่ละดัชนีของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้องในห่วงโซ่อุปทาน โดยสิ่งสำคัญของขั้นตอนนี้ คือ การกำหนดค่าต่างๆ อ้างอิงจากความสามารถของกระบวนการที่เป็นจริง

3.3 กำหนดให้ค่าต่ำสุดของแต่ละดัชนีราคาขายมี Scale = 0, ค่าที่ยอมรับได้มี Scale = 50 และค่าสูงสุดมี Scale = 100

3.4 จัดทำแนวโน้มอ้างอิง (Preference Curve) แกน Y คือ Scale ส่วนแกน X คือ ค่าสารสนเทศของแต่ละดัชนีราคาขาย

3.5 กำหนดน้ำหนัก (Ratio) เพื่อให้ความสำคัญกับแต่ละดัชนีราคาขาย โดยให้มีผลรวมของน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 1

3.6 นำค่าสารสนเทศที่ได้จากแต่ละดัชนีราคาขายมาทำการ Interpolate กับ Preference Curve เพื่อหาระดับคะแนน (ในกรณีจำเป็น)

3.7 คำนวณโดยหาผลรวมของน้ำหนักของแต่ละดัชนีราคาขายที่กำหนดไว้คูณกับระดับคะแนนของแต่ละดัชนีราคาขายที่ได้จะได้ค่าคะแนนรวมของดัชนีราคาขายทั้งหมดจากคะแนนเต็ม 100

4. สร้างข้อมูลทุติยภูมิด้วยการวิเคราะห์ร้อยละสัดส่วนแบ่งรายได้ ด้วยวิธี Multi-Criteria Performance Measurement/Analysis Technique (MCPMT) (3.1-3.7) ในกรณีผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูปลำไย ทุเรียน มังคุด เงาะ และสับปะรด ออกแบบชุดข้อมูลในการวิเคราะห์ผลดัง Table 1 โดยใช้จำนวนชุดข้อมูลในการวิเคราะห์ผลดัง Table 1

Table 1 Experiment design of processed fruit product.

Exp.	Fruit	Processing technology[1]	Product	Number of sampling unit (*N*)
1	Longan	Dried	Golden dried Longan	5
2	Longan	Dried	Dried Longan with peel	9
3	Longan	Paste	Paste Longan	3
4	Durian	Fried	Fried Durian	13
5	Durian	Paste	Paste Durian	10
6	Durian	Freeze dried	Freeze dried Durian	7
7	Mangosteen	Crush and pasteurized	Mangosteen Juice	5
8	Mangosteen	Paste	Paste Mangosteen	13
9	Rambutan	Osmotic dried	Osmotic-dried Rambutan	5
10	Rambutan	Paste	Paste Rambutan	5
11	Rambutan	Freeze dried	Freeze dried Rambutan	5
12	Pineapple	Dried	Dried Pineapple	5
13	Pineapple	Paste	Paste Pineapple	5

[1] = Selected from general processing technology in OTOP product.

5. คำนวนมูลค่าเพิ่มของแต่ละผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้อง ดังสมการที่ (1)

มูลค่าเพิ่ม (X) = ราคาขายของแต่ละผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (บาท) / ราคาขายของเกษตรกร (บาท) (1)

6. สังเคราะห์ข้อมูลมูลค่าเพิ่ม โครงสร้างการกระจายรายได้ และส่วนแบ่งรายได้ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในห่วงโซ่อุปทานผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูป สู่แนวทางการจัดการห่วงโซ่คุณค่าเพื่อการกระจายรายได้ที่เป็นธรรม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ร้อยละสัดส่วนแบ่งรายได้ของห่วงโซ่อุปทานผลิตภัณฑ์ OTOP กรณีศึกษา ผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูป ได้แก่ ลำไย ทุเรียน มังคุด เงาะ และสับปะรด ที่ผ่านเทคโนโลยีการแปรรูปต่างๆ จำนวนชุดการทดลองดังแสดงใน Table 1 เทคโนโลยีในการผลิตในกลุ่มผลิต OTOP นั้นโดยส่วนใหญ่ไม่ได้มีการใช้เทคโนโลยีในการผลิตที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ OTOP มีการใช้เทคโนโลยีในการผลิต คือ การทอดร้อยละ 24 อบแห้งร้อยละ 21 การกวนร้อยละ 12 การตากร้อยละ 12 การหมักดองร้อยละ 11 การนึ่งร้อยละ 10 และอื่น ร้อยละ 10 ดังนั้นในการคลี่ภาพห่วงโซ่ผลิตภัณฑ์ OTOP ในงานวิจัยนี้เป็นการคลี่ภาพโดยใช้การพิจารณาจากรายได้ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในห่วงโซ่อุปทาน ดังนั้นเมื่อสืบค้นราคาขายของผลิตภัณฑ์ OTOP และการกระจายรายได้ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในแต่ละผลิตภัณฑ์ ดังแสดงใน Table 2 จะเห็นได้ว่าจากการคลี่ภาพรายได้นั้นผู้ที่มีรายได้สูงสุดของห่วงโซ่อุปทานผลิตภัณฑ์ OTOP คือ ผู้ขาย รองลงมา คือ ผู้แปรรูป ผู้รวบรวม และเกษตรกร ตามลำดับ

Table 2 Sale price of stakeholder chain in case of processed fruit product.

Exp. No.	Stake-holder	Sale Price (Bath)												
		Longan			Durian			Mangosteen		Rambutan			Pineapple	
		Dried	Dried with Peel	Paste	Fried	Paste	Freeze Dried	Juice	Paste	Osmotic Dried	Paste	Freeze dried	Dried	Paste
1	Farmers	50	15	8	300	120	150	26	65	230	184	230	17	125
2	Collectors	150	45	0	500	200	250	30	75	300	262	300	30	225
3	Processor	400	100	100	1200	450	1400	68	300	650	650	650	65	750
4	Salesman	1000	300	300	1800	750	2800	213	495	1200	1200	4500	150	850

จาก Table 2 จะเห็นถึงข้อมูลรายได้ของภาคีที่เกี่ยวข้อง และเมื่อวิเคราะห์ถึงสัดส่วนแบ่งรายได้ ด้วยวิธี Multi-Criteria Performance Measurement/Analysis Technique (MCPMT) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์แนวโน้มภาพรวมของดัชนี ผลการวิเคราะห์ พบว่า เทคนิค MCPMT กำหนด 3 ค่า ได้แก่ ค่าต่ำสุด (Minimum) = 0, ค่าเฉลี่ย (Average) = 50 และค่าสูงสุด (Maximum) = 100 จากนั้นนำทั้ง 3 ค่า มาพล็อตกราฟเพื่อคำนวณหา Preference curve ของช่วงข้อมูล 0-50 และ 50-100 เพื่อใช้เป็นสมการตัวแทนในการหา Ratio ของข้อมูลอื่นๆ โดยกำหนดดัชนีราคา (บาท) ดังแสดงใน Table 3 ดังนี้

Table 3 Level of sale price index in case of processed fruit product .

Index	Sale Price (Bath)												
	Longan			Durian			Mangosteen		Rambutan			Pineapple	
	Dried	Dried with Peel	Paste	Fried	Paste	Freeze Dried	Juice	Paste	Osmotic Dried	Paste	Freeze dried	Dried	Paste
Minimum	50	15	8	300	120	150	26	65	230	184	230	16.65	125
Average	400	115	115	950	380	1150	84.25	233.75	595	574	1420	65.1	487.5
Maximum	1000	300	300	1800	750	2800	213	495	1200	1200	4500	150	850

จาก Table 3 แสดงให้เห็นถึงค่าต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุด สำหรับใช้ในการสร้าง Preference curve โดยจากการสร้าง Preference curve จะทราบค่าของระดับคะแนนของดัชนีที่ศึกษา ซึ่งจากศึกษาผลิตภัณฑ์ OTOP นั้นจะเป็นการศึกษาในดัชนีราคาของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับผู้มีวนได้ส่วนเสียในห่วงโซ่อุปทาน จะเห็นว่าหากแบ่งระดับคะแนนของราคาขายผลิตภัณฑ์ OTOP ตั้งแต่ 0-100 แล้วนั้น รายได้ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย คือ เกษตรกร ผู้รวบรวม ผู้แปรรูป และผู้ขาย จะมีระดับคะแนนของรายได้อยู่ที่เท่าไรของสเกลนั้น ซึ่งเป็นการบ่งชี้ให้เห็นถึงสัดส่วนรายได้ที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ OTOP กรณีผลไม้แปรรูป คำนวณระดับคะแนนของข้อมูลราคาเพื่อใช้สำหรับการคำนวณสัดส่วนรายได้ (Table 4) ดังนี้

Table 4 The Percentage of Proportion earning in case of processed fruit product

Stake holder	Longan (%)			Durian (%)			Mangosteen (%)		Rambutan (%)			Pineapple (%)		Average (%)
	Dried	Dried with Peel	Paste	Fried	Paste	Freeze Dried	Juice	Paste	Osmotic Dried	Paste	Freeze dried	Dried	Paste	
Farmers	6.25	6.52	3.92	15.79	15.79	6.52	15.43	13.9	19.33	16.03	8.10	12.73	12.82	11.78
Collectors	12.5	13.04	0	10.53	10.53	4.35	2.37	2.14	5.88	6.79	2.46	10.18	10.26	7.00
Processor	31.25	23.91	45.1	36.84	32.89	50	22.55	48.13	29.41	33.8	12.32	26.78	53.85	34.37
Salesman	50	56.52	50.98	36.84	40.79	39.13	59.64	35.83	45.38	43.38	77.11	50.31	23.08	46.85

จาก Table 4 แสดงถึงการวิเคราะห์ร้อยละสัดส่วนรายได้ของผลิตภัณฑ์ OTOP กรณีผลไม้แปรรูป คือ ลำไย ทุเรียน มังคุด เงาะ และสับปะรด เมื่อคลี่ภาพร้อยละสัดส่วนแบ่งรายได้ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียของห่วงโซ่อุทาน จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ผู้ขายมีร้อยละสัดส่วนรายได้มากที่สุดของห่วงโซ่อุปทาน คือ ร้อยละ 46.85 รองลงมาคือ ผู้แปรรูป ร้อยละ 34.37 เกษตรกร ร้อยละ 11.78 และผู้รวบรวม ร้อยละ 7 จากผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า เกษตรกรนั้นมีรายได้เพียงร้อยละ 6-12 เท่านั้น ซึ่งร้อยละสัดส่วนรายได้ที่ต่ำของห่วงโซ่อุปทาน ซึ่งในการช่วยส่งเสริมให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มสูงขึ้น มีแนวทางการดำเนินงาน คือ การเพิ่มบทบาทในห่วงโซ่คุณค่าสำหรับกลุ่ม OTOP ผลไม้แปรรูป โดยให้มีผู้แปรรูปขั้นต้นเพิ่มขึ้นในห่วงโซ่อุปทาน (Table 5, Figure 3)

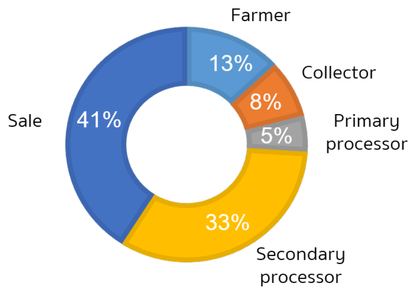


Figure 3 The Percentage of Proportion earning in case of processed fruit product.

Table 5 Added value of agricultural raw material after processed.

Agricultural raw material	Added value (Times)
Longan	26
Durian	10
Mangosteen	8
Rambutan	10
Pineapple	8
Average	12.4

โดยการเพิ่มชุดข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ห่วงโซ่อุทานของผลิตภัณฑ์ OTOP กรณีศึกษา ผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูป เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย (Table 5, Figure 3) พบว่า เป็นการเพิ่มบทบาทภาคที่เกี่ยวข้องในห่วงโซ่เดิมที่มี 4 ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย คือ เกษตรกร ผู้รวบรวม ผู้แปรรูป และผู้ขาย เป็น 5 ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย คือ เกษตรกร ผู้รวบรวม ผู้แปรรูปขั้นต้น ผู้แปรรูป และผู้ขาย เพียงแค่เพิ่มบทบาทเกษตรกรเองก็จะมีรายได้เพิ่มขึ้น แต่หากเกษตรกรผันตัวไปเป็นผู้รวบรวม หรือผู้แปรรูปขั้นต้น เกษตรกรจะมีร้อยละรายได้สูงถึง ร้อยละ 21 และร้อยละ 26 ตามลำดับ

สรุป

ผลการคลี่ภาพและวิเคราะห์ห่วงโซ่อุปทานเดิมของผลิตภัณฑ์ OTOP กรณีศึกษา ผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูป พบว่า วัตถุดิบทางการเกษตรของประเทศไทยกลุ่มผลไม้ คือ ลำไย ทุเรียน มังคุด เงาะ และสับปะรด เมื่อใช้เทคโนโลยีขั้นต้นในการแปรรูปมีมูลค่าเพิ่มเท่ากับ 26 10 8 10 และ 8 เท่า ตามลำดับ โดยมีร้อยละสัดส่วนแบ่งรายได้เรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ ผู้ขาย ผู้แปรรูป เกษตรกร ผู้รวบรวม และผู้แปรรูปขั้นต้น ตามลำดับ โดยเกษตรกรจะได้รับร้อยละสัดส่วนแบ่งรายได้ตั้งแต่ 6 – 13 ซึ่งการเพิ่มสัดส่วนแบ่งรายได้ให้กับเกษตรกรภายใต้บริบทที่เหมาะสมกับองค์ความรู้และความสามารถเดิมของเกษตรกรในระยะเริ่มต้น คือ การเพิ่มบทบาทในห่วงโซ่อุปทานโดยให้เกษตรกรเป็นผู้รวบรวม และ/หรือผู้แปรรูปขั้นต้น ซึ่งสามารถเพิ่มสัดส่วนแบ่งรายได้ให้สูงขึ้นถึงร้อยละ 26 ทั้งนี้ เกษตรกรต้องปรับตัวและเตรียมความพร้อมทั้งในด้านความรู้ ทักษะ และการบริหาร/จัดการ เพื่อยกระดับขีดความสามารถในการเรียนรู้และการประกอบการ และสอดคล้องกับแนวคิดของภาครัฐในการพัฒนาเกษตรกรให้เป็นผู้ประกอบการ เพื่อขับเคลื่อนเศรษฐกิจฐานรากของประเทศ อันจะนำมาสู่ความสมดุลและยั่งยืนของภาคเกษตรกรรมไทยในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยอุตสาหกรรมเกษตรร่วมกับเครือข่ายพันธมิตร (Eat @ East) ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร และภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนการวิจัย ตลอดจนแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

เอกสารอ้างอิง

บัณฑิต อินณวงศ์. 2558. การพัฒนาผลิตภัณฑ์เกษตรแปรรูปเพื่อรองรับการต่อยอดเชิงพาณิชย์สู่การสร้างรูปแบบการขับเคลื่อนสินค้าเกษตรแปรรูปอย่างยั่งยืนภายใต้บริบทของ ประเทศไทย รุ่นที่ 2 ภายใต้แผนงานวิจัยมุ่งเป้าตอบสนองความต้องการของประเทศโดยเร่งด่วน กลุ่มเรื่องอาหาร. **สำนักงานพัฒนาการวิจัยเกษตร (องค์การมหาชน).**

ปิยะฉัตร จารุธีรศานต์ และ จรีพร ศรีทอง. 2560. การส่งเสริมการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน: กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์โอทอป จังหวัดสมุทรปราการ. **วารสารดุษฎีบัณฑิตทางสังคมศาสตร์.** 7(2): 190-201.

ปิยะวัฒน์ ชนินทร์ตระกูล. 2562. การวัดประสิทธิภาพโซ่อุปทาน: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ กลุ่ม A ในจังหวัดชลบุรี. **วารสารวิทยาลัยโลจิสติกต์และซัพพลายเชน.** 5(1): 20-33.

ปิยาภรณ์ มาลี. 2558. การประยุกต์ใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพโซ่อุปทานกับผู้ประกอบการโอทอปในจังหวัดชลบุรี. **วิทยานิพนธ์สาขาวิชาการจัดการขนส่งและโลจิสติกส์** มหาวิทยาลัยบูรภา.

Phusavat, K. 2013. Productivity Management in an Organization Measurement and Analysis. Published by ToKnowPress Bangkok Celje Lublin.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Subject: Natural Resources and Environment

ภาคบรรยาย
Oral Presentation

KU
KASETSART UNIVERSITY

Water Footprint of Rice Production for Individual and Large-Scale Farmers in Phichit Province of Thailand

Tharinee Senakum[1], Noppol Arunrat[1*], Nathsuda Pumijumnong[1], Worachart Wisawapipat[2]
Winai Chaowiwat[3] and Uthai Chareonwong[4]

ABSTRACT

The objectives of this study were to assess and compare the water footprint of rice production for individual and large-scale farmers in Phichit Province, Thailand by using CROPWAT Model 8.0. For data integration, the weather data were obtained from the Meteorological Department during 1992-2017. Furthermore, the farmer management practices were collected from individual and large-scale farmers in Rang Nok Sub-district, Sam Ngam District and Thap Man Sub-district, Ta Phan Hin District. The most of the farmers grow RD41, RD57, RD49, and KDML105 rice cultivars. The results showed the highest of green water footprint in the major rice, whereas the blue water footprint was the richest in the second rice on both individual and large-scale farmers.

RD41 cultivar used the lowest of total water footprint, while KDML105 consumed the highest of total water footprint. In the part of large-scale farmers generated less grey water footprint than individual farmers in both sites. In Rang Nok Sub-district, individual farmers produced of grey water footprint at 900 m^3/ton while large-scale farmers performed 479 m^3/ton. For Thap Man Sub-district, individual farmers generated a grey water footprint 718 m^3/ton whereas large-scale farmers were 476 m^3/ton. Because the large-scale farmers applied less chemical fertilizers, insecticide and herbicide than the individual farmers. Therefore, the large agricultural extension project should be supported.

Key words: CROPWAT model 8.0, Individual Farmers, Large Scale Farmers, Rice, Water Footprint

[*] Corresponding author; e-mail address: noppol.aru@mahidol.ac.th

[1] Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Nakhon Pathom 73170

[2] Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900

[3] Hydro-Informatics Institute, Bangkok 10400

[4] Thai Telecommunication Relay Service, Bangkok Noi, Bangkok 10700

INTRODUCTION

In the agricultural sector of Thailand, the Thai farmers have rice cultivation a major income source and its raw material of product for several industries (Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2018). Therefore, the implementation guideline of a large agricultural extension system project is an important project of the Ministry of Agriculture and Cooperatives. The project aims to support farmers to create a farming community that cultivate the same rice in nearby areas and has a joint agreement.

The project focus on the production system, and marketing, management in order to improve agricultural production structure, production efficiency increase in the target area of large-scale agricultural projects, more opportunities provide for Thai farmers, production cost reduce and create sustainable security among farmers. In the past, farmers used chemical fertilizers and it had a strong impact on health and environment issues. Hence, a community pest management center has been established to promote the use of biologically active substances.

The water footprint is a measurement of water using that manufacturers or consumers used in products and services on both directly and indirectly (G-Able, 2018). It also shows the amount of used water; additionally, the amount of released wastewater in location and duration of water usage. The water footprint can be separated into 3 parts such as the blue water footprint is blue water resources (surface and groundwater). Subsequently, the green water footprint refers to the amount of rainfall used during the rice cultivation, and the grey water footprint refers to the volume of polluted water, which is quantified as the volume of water that is required to dilute pollutants to such an extent that the quality of the ambient water remains above agreed water quality standards (Hoekstra, 2011).

The water footprint of study mainly investigates place at a large rice extension area at Phichit province of Thailand. Effective water management is also adopted in the study as an alternative for farmers to maximum benefits and value of water usage. This study evaluated the amount of water consumption from various steps in rice cultivation among large-scale farmers and individual farmers. The water consumption data also is also beneficial for water resource management and planning for individual and large-scale rice cultivation, which makes consideration of the use of water for cultivation in order to increase the efficiency of rice cultivation in the future.

MATERIALS AND METHODS

1. Study area

The study was carried out individual and large scale farmer's site at Rang Nok sub-district, Sam Ngam district and Thap Man sub-district, Ta Phan Hin district in Phichit province of Thailand (Figure 1).

2. Data collection

2.1 Secondary data

2.2.1 Local information in Phichit province with 2 groups of farmers as individual and large scale by questionnaires method on agricultural water management, rice cultivation preparation and the number of fertilizer products and yields.

2.2.2 Weather data used from Meteorological Department, such as maximum and minimum temperature, relative humidity, wind speed at a height of 2 meters from the ground, average

monthly rainfall and solar energy during 1992-2017. For reference crop evapotranspiration calculation (ETo) mm/day using Penman-Monteith equation by Cropwat 8.0 software (FAO, 2010).

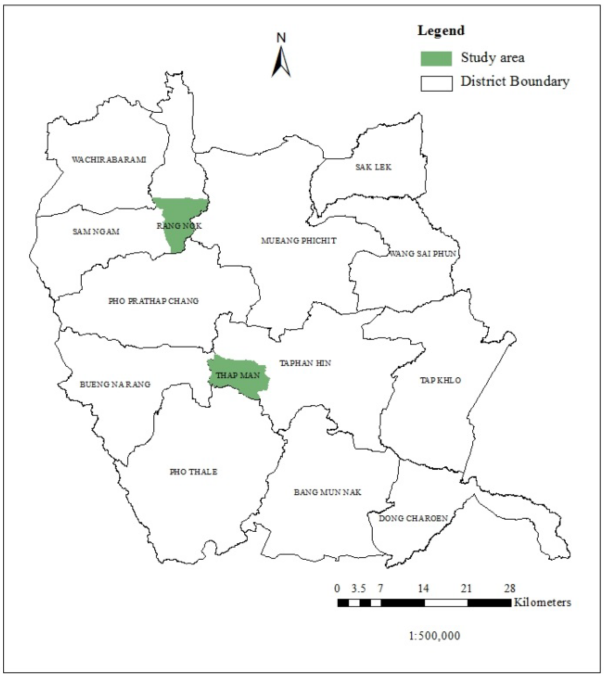


Figure 1 Study area in Phichit Province of Thailand.

2.2.3 Soil data such as total available soil moisture (TAM), infiltration rate, root restricting soil layer and Initial soil moisture depletion were assessed with Cropwat 8.0 program, this research uses soil type black clay soil.

2.2.4 Crop data requirement coefficient (Kc) data of initial stage, development stage, flowering stage, ripening stage, rooting depth and crop yield response factor (Ky) were operated by Cropwat 8.0 program.

3. Calculation of water footprint of rice

The weather, soil, and crop data were inserted into Cropwat 8.0 Program to compute Crop water requirement data (CWR).

3.1 Green and Blue water evapotranspiration calculating

3.1.1 Green water evapotranspiration (ETgreen, mm/day) calculated either a minimum of total crop evapotranspiration (ETc) or effective rainfall (Peff, calculated form USDA soil conservation service by Cropwat 8.0) on equation 3.1

$$ETgreen = \min (ETc, Peff) \quad (3.1)$$

3.1.2 Blue water evapotranspiration (ETblue, mm/day) computed either a maximum is total crop evapotranspiration minus effective rainfall (Peff), or value is zero when effective rainfall (Peff) more than crop evapotranspiration on equation 3.2

$$ETblue = \max (0, ETc-Peff) \quad (3.2)$$

3.1.3 Calculation Crop water use is the accumulation of daily evapotranspiration over the length growing period (lgp)

1) Crop water use calculation (m^3/ha) as shown on equation 3.3 and 3.4, respectively

CWUgreen = $10*\sum_{d=1}^{lgp} ETgreen$ (3.3)

CWUblue = $10*\sum_{d=1}^{lgp} ETblue$ (3.4)

3.1.4 Calculation of water footprint

1) Green and blue water footprint computing (WFgreen and WFblue, m^3/ton) were crop water use (CWU) divide Yield rice product with husk base on rice seed moisture = 10 percet (Y, tons/ha)

WFgreen = $\frac{CWUgreen}{Y}$ (3.5)

WFblue = $\frac{CWUblue}{Y}$ (3.6)

3.1.5 Grey water footprint of rice cultivation. (WFproc, gray, m^3/ton) calculated according to the rate of nitrogen chemical fertilizer using per hectare (AR, kg./ha) multiplied by the washout ratio (α assumed default value = 15 percentage equal 0.10) divided by the maximum permissible nitrate (NO^-_3) concentration of surface water standard in Thailand nitrate (NO^-_3) concentration = 5 mg/l (Cmax, mg/l) minus the natural concentration Cnat = 0 mg/l When natural concentrations are not known precisely but are estimated to be low, for simplicity one may assume cnat = 0. This will, however, result in an underestimated grey water footprint when cnat is actually not equal to zero. for the pollution considered (Cnat, mg/l) and divided by the crop yield (Y, tons/ha)

WFproc,grey= $\frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})}{Y}$ (3.7)

3.2 Total water footprint (WFcrop, m^3 ton) of the rice crop was summed on equation 3.8

WFcrop = WFgreen + WFblue +WFgrey (3.8)

RESULTS AND DISCUSSION

1. Rice Cultivation Yield and Fertilizer amount in Phichit Province

The major of rice yield as RD41, RD57 and RD49 cultivars of individual farmers in Rang Nok sub-district performed 4.38 to 5.00 ton/ha whereas KDML105 cultivar showed least yield 3.13 ton/ha. Similar, the large scale farmer of major rice RD41, RD57 and RD49 yielded 4.72 to 5.38 ton/ha while KDML105 expressed 3.52 ton/ha, respectively. For Thap Man Sub-district, the rice yields RD41, RD57 and RD49 of individual farmers that found 4.60 to 4.90 ton/ha following with KDML105 was 3.44 ton/ha as well as KDML105 was 3.56 ton/ha, respectively (Table 1).

Second rice planting, the yields of RD41, RD57 and RD49 were 4.38 to 5.13 ton/ha of individual farmers in Rang Nok sub-district, however a large scale farmers were 4.45 to 5.42 ton/ha. In Thap Man Sub-district, the rice RD41, RD57 and RD49 showed not only 4.38 to 4.77 ton/ha, but also 4.73 to 5.31 ton/ha on both individual farmers and large scale farmers (Table 1).

The total chemical fertilizer application in Rang Nok Sub-district for major rice cultivation were 96.68 and 49.05 kg/ha for individual farmers and large scale farmers, respectively. In Thap Man Sub-district, the 85.89 kg/ha and 62.57 kg/ha of total chemical fertilizer application were applied for individual farmers and large scale farmers, respectively. For second rice cropping, the total chemical fertilizer applications were obtained 101.33 kg/ha and 57.57 kg/ha in Rang Nok Sub-district for individual farmers and large scale farmers, respectively. For Thap Man Sub-district, the individual farmers and large scale farmers gained 85.31 and 63.90 kg/ha, respectively (Table 1).

Table 1 Showed the comparison of individual farmers and large scale farmers of yield and fertilizer usage for major and second rice cultivation in the Rang Nok and Thap Man sub-district, Phichit Province.

	Sub-district	Type of Farmers	Yield (ton/ha)				Fertilizer (kg/ha)		
			RD 41	RD 57	RD 49	KDML 105	*Chem kg/ha	**Org kg/ha	Total N kg/ha
Major Rice	Rang Nok	Individual	4.38	4.41	5.00	3.13	95.42	1.26	96.68
		Large scale	5.13	4.72	5.38	3.52	48.67	0.38	49.05
	Thap Man	Individual	4.60	4.90	4.79	3.44	85.21	0.68	85.89
		Large scale	5.17	5.31	5.63	3.56	60.75	1.83	62.57
Second Rice	Rang Nok	Individual	4.38	5.13	4.75	0.00	99.88	1.44	101.33
		Large scale	5.42	5.26	4.45	0.00	56.74	0.84	57.57
	Thap Man	Individual	4.77	4.52	4.38	0.00	84.60	0.71	85.31
		Large scale	4.84	5.31	4.73	0.00	61.95	1.95	63.90

* Chem = Chemical Fertilizer

** Org = Organic Fertilizer

2. The water footprint amount of rice yield (rice product with husk and base on rice seed moisture = 15 percent) for individual and large scale farmers

The calculation an average water footprint was assessed in rice production at Rang Nok and Thap Man sub-district of Phichit Province. The major rice RD41 yield of individual farmers were used green, blue, and grey water 1,256, 91 and 442 m^3/ton whereas a large scale farmers showed green, blue and grey water 1,1934, 87 and 213 m^3/ton, respectively. In the part of Thap Man sub-district, individual farmers performed green, blue, and grey water footprint 1,072, 78 and 335 m^3/ton while the large scale farmers expressed green, blue and grey water 1,063, 77 and 238 m^3/ton, respectively.

In the second rice cultivation, the individual farmers in Rang Nok sub-district used green, blue, and grey water 183, 1,087 and 463 m^3/ton comparative with the large scale farmers consumed green, blue and grey water at 168, 998 and 242 m^3/ton, respectively. Additionally, the individual farmers in Thap Man sub-district evaluated green, blue, and grey water footprint at 148, 878 and 315 m^3/ton while the large scale farmers resulted 165, 982 and 238 m^3/ton of green, blue and grey water, respectively (Table2).

Table 2 The water footprint amount on both individual farmers and large scale farmers from major and second rice of rice RD41 cultivation in Rang Nok and Thap Man sub-district, Phichit Province.

Sub-district			Type of Farmers	Water Footprint of rice RD41			
				Green (m^3/ton)	Blue (m^3/ton)	Grey (m^3/ton)	Total (m^3/ton)
Major Rice	Rang Nok	1	Individual farmers	1256	91	442	1789
		2	Large scale farmers	1194	86	213	1494
	Thap Man	3	Individual farmers	1072	78	335	1485
		4	Large scale farmers	1063	77	238	1378
Second Rice	Rang Nok	1	Individual farmers	183	1087	463	1733
		2	Large scale farmers	168	998	242	1407
	Thap Man	3	Individual farmers	148	878	315	1341
		4	Large scale farmers	165	982	238	1385

For planting RD57 rice in Rang Nok Sub-district, individual farmers consumed green, blue, and grey water 1,313 175 and 438 m^3/ton, respectively. The large scale farmers used 1,180, 157 and 200 m^3/ton of green, blue and grey water, respectively. For rice cultivation in Thap Man sub-district, individual farmers resulted green, blue and grey water footprint 1,226, 163 and 364 m^3/ton as well as the large scale farmers used green, blue and grey water 1,090, 145 and 238 m^3/ton, respectively.

In the second rice cultivation of Rang Nok sub-district, individual farmers consumed green, blue, and grey water at 197, 972 and 395 m^3/ton, respectively. Large scale farmers used 224, 1102 and 255 m^3/ton of green, blue and grey water, respectively. For rice cultivation in Thap Man sub-district, individual farmers used green, blue, and grey water footprint 192, 948 and 325 m^3/ton, respectively, while the large scale farmers used green, blue and grey water 190, 937 and 238 m^3/ton, respectively (Table 3).

For planting RD49 rice in Rang Nok Sub-district, individual farmers consumed green, blue, and grey water 1125, 154 and 387 m^3/ton, Furthermore, the large scale farmers used 1174, 161 and 205 m^3/ton of green, blue and grey water, respectively. In the part of Thap Man sub-district, individual farmers investigated green, blue, and grey water footprint 1045, 143 and 319 m^3/ton whereas the large scale farmers used green, blue and grey water 1000, 137 and 238 m^3/ton, respectively.

In the second rice cultivation of Rang Nok sub-district, individual farmers consumed green, blue, and grey water at 210, 1010 and 427 m^3/ton however the large scale farmers used 228, 1096 and 263 m^3/ton of green, blue and grey water respectively. For Thap Man sub-district, individual farmers used green, blue, and grey water footprint 224, 1077 and 383 m^3/ton comparative with a large scale farmers assessed green, blue and grey water 211, 1014 and 238 m^3/ton (Table 4).

Table 3 The water footprint amount of individual farmers and large scale farmers from major and second rice of rice RD57 cultivation in Rang Nok and Thap Man sub-district, Phichit Province.

	Sub-district		Type of Farmers	Water Footprint of rice RD57			
				Green (m^3/ton)	Blue (m^3/ton)	Grey (m^3/ton)	Total (m^3/ton)
Major	Rang Nok	5	Individual farmers	1313	175	438	1927
Rice		6	Large scale farmers	1181	157	200	1538
	Thap Man	7	Individual farmers	1226	163	364	1753
		7	Large scale farmers	1090	145	238	1474
Second	Rang Nok	5	Individual farmers	197	972	395	1564
Rice		6	Large scale farmers	224	1102	255	1580
	Thap Man	7	Individual farmers	192	948	325	1465
		8	Large scale farmers	190	937	238	1366

Table 4 The water footprint amount not only individual farmers but also large scale farmers on both major and second rice of rice RD49 cultivation in Rang Nok and Thap Man sub-district, Phichit Province.

	Sub-district		Type of Farmers	Water Footprint of rice RD49			
				Green (m^3/ton)	Blue (m^3/ton)	Grey (m^3/ton)	Total (m^3/ton)
Major	Rang Nok	9	Individual farmers	1125	154	387	1666
Rice		10	Large scale farmers	1174	161	205	1540
	Thap Man	11	Individual farmers	1045	143	319	1508
		12	Large scale farmers	1000	137	238	1376
Second	Rang Nok	9	Individual farmers	210	1010	427	1646
Rice		10	Large scale farmers	228	1096	263	1588
	Thap Man	11	Individual farmers	224	1077	383	1684
		12	Large scale farmers	211	1014	238	1463

For planting KDML105 rice cultivation in Rang Nok Sub-district, individual farmers consumed green, blue, and grey water 1835, 282 and 619 m^3/ton as well as the large scale farmers used 1668, 256 and 285 m^3/ton of green, blue and grey water, respectively. For Thap Man sub-district, the individual farmers calculated of green, blue, and grey water footprint 1631, 250 and 489 m^3/ton while the large scale farmers computed green, blue and grey water 1,610 247 and 238 m^3/ton, respectively. However, KDML105 rice was not grown for the second rice due to it is a photosensitive rice cultivar (Table 5).

Table 5 The water footprint of Individual farmers and large scale farmers from the major rice of KDML105 cultivation in Rang Nok and Thap Man sub-district, Phichit Province.

	Sub-district		Type of Farmers	Water Footprint of KDML105			
				Green (m^3/ton)	Blue (m^3/ton)	Grey (m^3/ton)	Total (m^3/ton)
Major Rice	Rang Nok	13	Individual farmers	1835	282	619	2736
		14	Large scale farmers	1668	256	285	2210
	Thap Man	15	Individual farmers	1631	250	489	2370
		16	Large scale farmers	1610	247	238	2095

3. **The comparison of water footprint between individual farmers and large scale farmers**

In the major rice cultivation was the green water footprint higher than the blue water footprint of Rang Nok Sub-district because the major rice cultivation planted during the rainy season (Figure 1). Planting RD41 rice consumed 442 and 213 m^3/ton, RD57 rice used 438 and 200 m^3/ton, RD49 rice performed 387 and 205 m^3/ton as well as KDML105 consumed 619 and 285 m^3/ton, respectively. Moreover, the individual farmers released more grey water than the large scale farmers. Similarly, in Thap Man sub-district, the individual farmers emitted more grey water than the large scale farmers. Planting RD41 rice consumed 335 and 238 m^3/ton, RD57 rice showed 364 and 238 m^3/ton, RD49 rice used 319 and 238 m^3/ton; subsequently, KDML105 contained 489 and 238 m^3/ton of green and blue water footprints, respectively.

On the other hand in the second rice cultivation was the blue water footprint higher than the green water footprint in Rang Nok Sub-district because it is in the dry season (Figure 2). Cultivation RD41 rice consumed 463 and 242 m^3/ton, RD57 rice used 395 and 255 together with RD49 rice showed 427 and 263 m^3/ton respectively. Furthermore, the individual farmers released more grey water footprint than the large scale farmers. For in Thap Man Sub-district, individual farmers emitted more grey water footprints than the large scale farmers. Planting RD41 rice consumed 315 and 238 m^3/ton, RD57 rice expressed 325 and 238 m^3/ton throughout RD49 resulted 383 and 238 m^3/ton of green and blue water footprints, respectively.

Total water footprint amount was assessed the major rice cultivation of Rang Nok sub-district, which the individual farmers consumed more total water footprint than the large scale farmers. Consequently, planting RD41 rice used 1,789 and 1,494 m^3/ton, RD57 rice resulted 1,927 and 1,538 m^3/ton, RD49 rice performed 1,666 and 1540 m^3/ton together with KDML105 showed 2,736 and 2,210 m^3/ton respectively. Corresponding with Thap Man Sub-district, the individual farmers used total water footprint higher than the large scale farmers. Planting RD41 rice used 1,485 and 1,378 m^3/ton, RD57 rice performed 1,753 and 1474 m^3/ton, RD49 rice obtained 1,508 and 1,376 m^3/ton as well as KDML105 resulted 2,370 and 2,095 m^3/ton, respectively.

Similarly, in the second rice cultivation was calculated total water footprint of Rang Nok Sub-district. The result individual farmers used total water footprint higher than the large scale farmers. Planting RD41 rice used 1,733 and 1,407 m^3/ton, RD57 rice consumed 1,564 and 1,580 m^3/ton and RD49 rice contained 1,646 and 1,588 m^3/ton, respectively. In the same result of Thap Man Sub-district, which the individual farmers used water footprint higher than the large scale farmers. Planting RD41

rice used 1,341 and 1,385 m^3/ton, RD57 rice resulted 1,465 and 1,366 m^3/ton and RD49 rice expressed 1,684 and 1,463 m^3/ton respectively, because the individual farmers use of fertilizer, both chemical fertilizer and organic fertilizer that is more the large scale farmers.

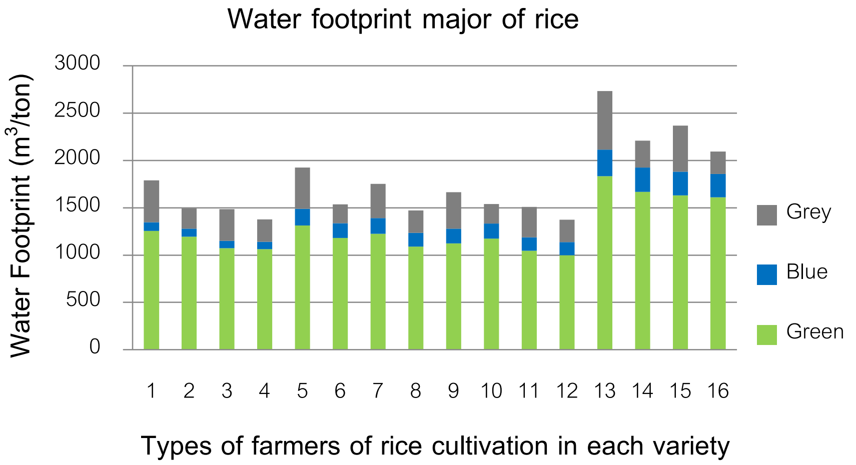


Figure 2 Water footprint of major rice cultivation of individual farmers and large scale farmers at Phichit Province of Thailand.

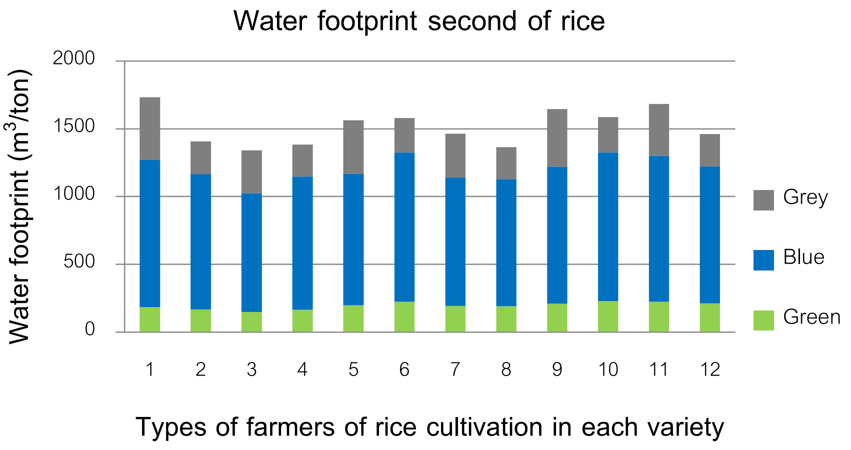


Figure 3 Water footprint of second rice cultivation of individual farmers and large scale farmers in Phichit Province of Thailand.

CONCLUSION

The water footprint of rice production in this study was classified into two groups as individual farmers and large-scale farmers. The results that found the major rice cultivation consumed more green water than blue water because the major rice cultivation planted during the rainy season (June to October). On the other hand, in the second rice cultivation, blue water was used more than green water because it is in the dry season (November to March). The large-scale farmers generated less the grey water footprint than individual farmers on both sites, which to be because the large-scale farmers less chemical fertilizers, insecticide and herbicide usage than the individual farmers. Therefore, the large agricultural extension project should be supported.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was partially supported by Mahidol University Alumni (MUA) 2019, and also was funded by Biodiversity-based Economy Development Office (Public Organization) (BEDO) and National Research Council of Thailand (NRCT) (Grand No. 36/2561).

REFERENCES

Bonamente E., F. Scrucca, S. Rinaldi, M. Merico, F. Asdrubali and L. Lamastra. 2016. Environmental impact of an Italian wine bottle: Carbon and water footprint assessment. **Science of the Total Environment** 560-561: 274-283.

Buapan P., N. Sohheng and N. Boonlue. 2018. The implementation of the policy on the agricultural promotion system of large plots of rice field type in Chachoengsao province. **VRU Research and Development Journal Humanities and Social Science** 13: 86-98 (in Thai)

Chapagain A.K., A.Y. Hoekstra. 2011. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. **Ecological Economics** 70: 749-758.

Food and Agriculture Organization. 2017. **Chapter 2: Crop water needs.** from: http://www.fao .org/docrep/s2022e/s2022e02.htm, March 12, 2019.

G-Able. 2013. **Water Footprint.** from: https://www.g-able.com/digital-review/water-footprint/, March 15, 2019.

Yoosabai, K. 2001. **Water footprint.** from: http://cwc.mwa.co.th/backend/article/file/4500_ 6277_25_09_2012.pdf, March 11, 2019. (in Thai)

Phukongka, C., S. Saiyasopon and K. Na Nong Kai. 2019. The Large Agricultural Policy Implementation in Udorn Thani Province. **Ramkhamhaeng University Journal: Graduate School** 2(1): 67-79.

Royal Irrigation Department. 2012. **Water needs of reference plants using the CROPWAT program.**, from: http://oopm.rid.go.th/subordinate/opm7/pdf/KM%202557/2_Bruz.pdf, March 9, 2019

Shabbir, H., T. Silalertruksa, P. Nilsalab, R. Mungkung, R. Sylvain and N. Chaiyawannakarn 2014. Water Footprint and Impact of Water Consumption for Food, Feed, Fuel Crops Production in Thailand. **Water**. 6: 1698-1718.

Silalertruksa, T, H. Shabbir, R. Mungkung, P. Nilsalab, N. Lecksiwilai, W. Sawaengsak. 2017. Implications of Water Use and Water Scarcity Footprint for Sustainable Rice Cultivation. **Sustainability.** 9: 2283.

Xiaotang J., G. Baojing, W. Yiyun and G. James 2016. Reducing China's fertilizer use by increasing farm size. **Glob Environ Change**. 41:26–32.

การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม

Removal of Natural Organic Matter by Alum Coagulation

ศิริพร สิงขโรทัย[1*] และ ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา[1]

Siriporn Singkharothai[1*] and Patcharaporn Suwanvitaya[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพน้ำดิบของการประปาส่วนภูมิภาค สาขาบางคล้า และหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้มในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (DOC และ NOM) และ ติดตามผลการใช้ผงถ่านกัมมันต์ (PAC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด ทำการทดลองด้วยวิธีการทดสอบการตกตะกอน (Jar test) โดยแปรผัน pH ปริมาณสารส้ม และ PAC และ ติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ในรูป DOC และ NOM (การดูดกลืนแสง UV_{254}) พบว่า น้ำดิบมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ 21.78 mg DOC/L ค่าการดูดกลืนแสง UV_{254} แสดงถึงการปนเปื้อนของสารอินทรีย์กลุ่ม aromatic ขณะที่การวิเคราะห์โดยเทคนิค FEEM ตรวจพบสารในกลุ่ม Humic-like Fulvic-like และ Tryptophan-like ยืนยันการปนเปื้อนของ NOM สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกำจัดสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้มคือ pH 5.5 ปริมาณสารส้ม 60 มิลลิกรัม/ลิตร DOC และ NOM ลดลง 38.48 และ 70.21% ตามลำดับ การใช้ PAC ที่ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารส้ม ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการกำจัด DOC และ NOM

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the quality of raw water used for Bang Khla water treatment plant and determine the optimal condition for organic removal (DOC and NOM) by alum coagulation process. Enhancing effect of Powder Activated Carbon (PAC) on alum coagulation was also investigated. The experiments was conducted by Jar Test at varying pH conditions, alum dosage and PAC dosage. Organic matter was determined as Dissolved Organic Carbon (DOC) and NOM (by UV_{254} absorbance). It was found that raw water was contaminated with 21.78 mg DOC/L. UV_{254} absorbance showed the contamination of aromatic compound while FEEM showed Humic-like Fulvic-like and Tryptophan-like peaks. These confirmed the presence of NOM. The optimal condition for organic removal by coagulation was at pH 5.5 and 60 mg/L alum dosage where 38.48% DOC and 70.21% NOM were removed. PAC showed no significant effect on enhancing the removal of DOC and NOM.

Key words: Natural organic matter, alum coagulation, powder activated carbon

* Corresponding author; e-mail address: rung.singkharothai@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

แหล่งน้ำในประเทศไทยที่การประปาส่วนภูมิภาค (กปภ.) ใช้เป็นน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาในแต่ละท้องที่นั้นมีความแตกต่างกันตามภูมิประเทศ ฤดูกาล รวมทั้งการขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม ส่งผลต่อทั้งคุณภาพและปริมาณของน้ำดิบ ปัญหาหลัก ได้แก่ การปนเปื้อนจากน้ำทิ้ง สิ่งปฏิกูลจากแหล่งชุมชน น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือ น้ำเสียจากพื้นที่ทำการเกษตรและการประมง สำหรับ การประปาส่วนภูมิภาคสาขาบางคล้า ใช้น้ำดิบในการผลิตน้ำประปาจากแหล่งน้ำที่อยู่ในบริเวณพื้นที่เลี้ยงกุ้งในกระชัง จึงพบการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter-DOM) และ สารในกลุ่มสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter-NOM) ในปริมาณค่อนข้างสูง ทำให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพของน้ำประปาด้าน รส กลิ่น สี และ การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบจ่ายน้ำ รวมไปถึงปัญหาที่เกิดตามมาจากการเปลี่ยนแปลงของ NOM

NOM เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ ประกอบด้วย โปรตีน น้ำตาลโมเลกุลเชิงซ้อน (polysaccharide) และ ฮิวมิค (humic substance) ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ แต่อาจอยู่ในรูปของอนุภาคแขวนลอย หรือ ดูดติดผิวอนุภาคอื่น โดยตัวของ NOM เองไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับคลอรีนจะได้สารผลิตภัณฑ์ (disinfection by product–DBP) ที่เป็นอันตราย เช่น trihalomethane และ haloacetic acid (THM และ HAA) โดยเฉพาะ NOM ที่มีโครงสร้างแบบ aromatic

การศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า ในกระบวนการผลิตน้ำประปาแบบ Conventional ที่ประกอบด้วยขั้นตอนการสร้าง-รวมตะกอน การตกตะกอน การกรองและการฆ่าเชื้อโรค สารอินทรีย์จะถูกกำจัดได้ในขั้นตอนการสร้าง-รวมตะกอนด้วยสารโคแอกกูแลนท์ประเภทโลหะซึ่งมีประจุบวก เนื่องจาก NOM มีหมู่ฟังก์ชั่นที่มีประจุลบ (Gregory and Duan, 2001) สารโคแอกกูแลนท์ประเภทสารอนินทรีย์สามารถกำจัด aromatic hydrocarbon ได้ดีแต่สารประเภท aliphatic hydrocarbon เป็นส่วนที่กำจัดได้ยากด้วยวิธีนี้ (Fabris *et al.*, 2008) การใช้สารโคแอกกูแลนท์ร่วมกับผงถ่านกัมมันต์ (Powder Activated Carbon-PAC) เป็นทางเลือกที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด NOM ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำถึงปานกลาง ด้วยเหตุที่ PAC มีโครงสร้างที่มีรูพรุน มีพื้นที่ผิวมากจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนได้ (Matilainen *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2019)

การศึกษานี้ทำการสำรวจสภาวะการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำดิบของ กปภ. สาขาบางคล้า และทำการทดลองเพื่อหาสภาวะเหมาะสม (pH และ ปริมาณสารส้ม) ของกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้มในการกำจัดสารอินทรีย์ และประเมินผลของการใช้ PAC ร่วมกับสารส้มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ โดยวิเคราะห์ค่า DOC UV_{254} SUVA และ Fluorescence Excitation-Emission Matrix (FEEM) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บอกปริมาณสารอินทรีย์ และองค์ประกอบโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่ส่งผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการตกตะกอน

อุปกรณ์และวิธีการ

น้ำตัวอย่าง

แหล่งน้ำที่เป็นพื้นที่ศึกษา คือ คลองวัดแจ้ง (ลำเลียงตามคลองชลประทาน) ต้นทางของแหล่งน้ำมาจากอ่างเก็บน้ำคลองสียัด ต.ท่าตะเกียบ อ.ท่าตะเกียบ จ.ฉะเชิงเทรา ลักษณะเป็นเขื่อนดิน ความจุ 420 ล้าน ลบ.ม. (สำนักพัฒนาแหล่งน้ำขนาดใหญ่, 2558) ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบของ กปภ. สาขาบางคล้า เก็บตัวอย่างน้ำเดือนละครั้งในช่วงเดือนพฤษภาคม ถึง กันยายน 2562 เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังแสดงใน Table 1 และใช้ในการทดลอง

Table 1 Analytical method for surface water parameter.

Parameter	Analytical method	Standard method*
pH	Electrometric	4500-H^+ B
Turbidity	Nephelometric method	2130 B
Alkalinity	Titration	2320 B
DOC	High-Temperature Combustion	5310 B
UV_{254}	Ultraviolet Absorption	5910 B
SUVA	$SUVA\ (L\bullet m^{-1}\bullet mg^{-1}) = 100 \times \left[\frac{UV_{254}(cm^{-1})}{DOC\ (mg/l)}\right]$	5910 B
FEEM	Excitation Emission Matrix spectroscopy Excitation 200-500 nm, Emission 250-550 nm.	**

* American Public Health Association (2012)

** Park *et al.*, (2019)

การทดลองกำจัดสารอินทรีย์โดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม

การทดลองใช้วิธีการทดสอบการตกตะกอน (Jar Test) สารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำ คือ สารส้ม [$Al_2(SO_4)_3\bullet 18H_2O$] ได้รับการอนุเคราะห์จาก กปภ. สาขาบางคล้า โดยเตรียม stock solution ที่ความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สารเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด NOM คือ PAC ใช้เครื่อง Jar Test แบบ 2 ใบพัด (VELP scientifica รุ่น manual JLT6) และบีกเกอร์ทรงสูงขนาด 1 ลิตร สภาวะของการทดสอบเป็นไปตามกระบวนการผลิตน้ำประปาของ กปภ.สาขาบางคล้า ใช้ความเร็วรอบในการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที ความเร็วรอบในการกวนช้าแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 นาที 45 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 นาที 25 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที

การทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การหาสภาวะ pH ที่เหมาะสม (ใช้สารส้ม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร แปรผัน pH ที่ 5, 5.5, 6, 6.5, 7 ปรับ pH ด้วยสารละลาย 0.2 N NaOH และ 0.2 N H_2SO_4) การหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม (ปรับสภาวะ pH ที่เหมาะสมตามผลการทดลอง แล้วแปรผันปริมาณสารส้ม ที่ความเข้มข้น 30, 50, 60, 70, 80, 90 มิลลิกรัมต่อลิตร) และการติดตามผลการใช้ PAC ร่วมกับสารส้มในการกำจัดสารอินทรีย์ (ทำการทดลองในสภาวะ pH และ ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม แปรผันปริมาณ PAC ที่ความเข้มข้น 40, 50, 60 มิลลิกรัมต่อลิตร)

สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสารอินทรีย์ในการทดลองทั้ง 3 ขั้นตอน พิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลือน้อยที่สุด โดยวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ส่วนที่เป็นสารละลาย นำน้ำใสส่วนบน

(supernatant) มากรองด้วย glass fiber filter (GF) ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่า DOC และ การดูดกลืนแสง UV_{254}

ผลและวิจารณ์

1. คุณภาพน้ำดิบของโรงผลิตน้ำประปาบางคล้า

ในการศึกษาคุณภาพน้ำดิบของโรงผลิตน้ำประปาบางคล้า เก็บตัวอย่างน้ำเดือนละครั้ง ในช่วงเดือนพฤษภาคม ถึง กันยายน 2562 ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน Table 2 โดยมีผลแสดงองค์ประกอบโครงสร้างของ NOM จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FEEM แสดงใน Figure 1

Table 2 Characteristics of raw water for Bang Khla water treatment plant.

Parameter	Unit	Mean	Min	Max
pH	-	6.94	6.62	7.05
Turbidity	NTU	39.6	27.5	50.40
Alkalinity	mg/l as $CaCO_3$	27.8	20.0	30.00
DOC	mg/l	21.78	16.81	24.75
UV_{254}	cm^{-1}	0.292	0.191	0.348
SUVA	L $mg^{-1}m^{-1}$	1.34	1.14	1.41

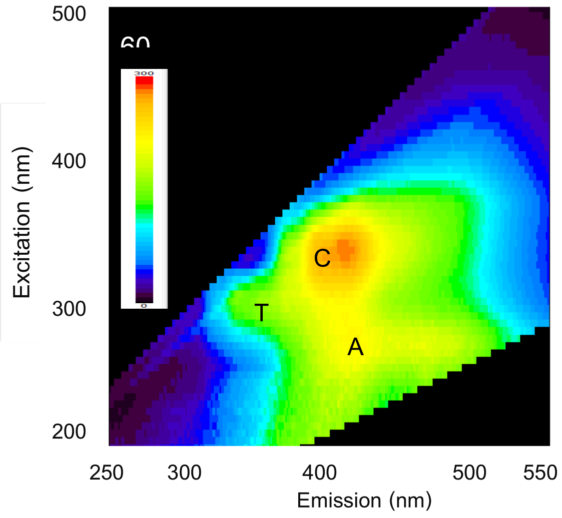


Figure 1 Fluorescence Excitation-Emission Matrix of raw water for Bang Khla water treatment plant.

จากผลวิเคราะห์พบว่าน้ำดิบสำหรับโรงผลิตน้ำประปาบางคล้า มีลักษณะสมบัติทางกายภาพเป็นที่ยอมรับได้สำหรับการผลิตน้ำประปา ตรวจพบสารอินทรีย์ละลายวิเคราะห์ในรูป DOC (Dissolved Organic Carbon) 21.78 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าการดูดกลืนแสง UV_{254} ซึ่งแสดงถึงการปนเปื้อนของสารอินทรีย์กลุ่ม aromatic ทั้งนี้คำนวณค่า SUVA ได้ค่า <2 ซึ่งแสดงว่าสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนมีสัดส่วนของ aromatic hydrocarbon ในระดับไม่สูงนัก หรือ มีสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำในกลุ่ม aliphatic hydrocarbon (*Matilainen et al*., 2010)

เมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์ Fluorescence Excitation-Emission Matrix ของน้ำดิบ พบ peak ที่เกี่ยวข้อง 3 peak คือ peak A (Ex 260-290 นาโนเมตร, Em 400-430 นาโนเมตร) peak C (Ex 310-360 นาโนเมตร, Em 390-430 นาโนเมตร) และ peak T (Ex 280-310 นาโนเมตร, Em 330-360 นาโนเมตร) ซึ่งตำแหน่ง

ดังกล่าวแสดงถึงสารประกอบกลุ่ม Humic-like, Fulvic-like และTryptophan-like ตามลำดับ (Bieroza *et al*., 2009; Park *et al*., 2019) โดยที่สเปคตรัมที่ peak C มีความเข้มสูงกว่าที่อื่น อาจกล่าวได้ว่า DOC ในน้ำดิบมีสารกลุ่ม Fulvic-like ในสัดส่วนสูงที่สุด

ลักษณะสมบัติของน้ำดิบในช่วงที่ทำการศึกษาสอดคล้องกับผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำของสถานีผลิตน้ำประปาบางคล้า (การประปาส่วนภูมิภาค, 2562)

2. การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม

ในขั้นตอนนี้ ทำการทดลองการตกตะกอน (Jar Test) ด้วยสารส้มในสภาวะต่าง ๆ โดยวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง ผลที่นำเสนอคิดจากค่าเฉลี่ย และติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารอินทรีย์ในรูป DOC การดูดกลืนแสง UV_{254} และ SUVA เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ ได้แก่ pH ปริมาณสารส้ม และปริมาณ PAC โดยหา Optimum dose ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อได้ความเข้มข้นของสารส้มและสภาวะ pH ที่เหมาะสมแล้ว จึงทดสอบต่อไปในขั้นที่ 3 ด้วยการเติม PAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ สภาวะเหมาะสมเลือกจากสภาวะที่ลดปริมาณ DOC ได้สูงที่สุด

2.1 การหาสภาวะ pH ที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารส้ม

ในการหา pH ที่เหมาะสม ทำ Jar Test ที่ปริมาณสารส้ม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร แปรผัน pH ที่ 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 ผลใน Figure 2 แสดงปริมาณ DOC คงเหลือหลังการตกตะกอนที่ pH ต่างๆ จะเห็นว่า ที่ pH 5.5 มีปริมาณ DOC คงเหลือน้อยที่สุด (จากค่า DOC ตั้งต้น 21.78 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 13.55 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นการกำจัด 37.79%) ปริมาณ DOC คงเหลือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า pH ที่สูงขึ้น โดย Qin *et al*., (2006) อธิบายว่า pH เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสารโคแอกกูแลนท์ประเภทโลหะในการกำจัดสารอินทรีย์ เนื่องจากสารอินทรีย์ดังกล่าวมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นประจุลบ เมื่อมีประจุบวกในระบบมากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดจึงสูงขึ้น ค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัด DOC โดยทั่วไปเท่ากับ 5-6 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า pH ที่ใช้ในการกำจัดสารแขวนลอย ทั้งนี้ค่า pH ที่ต่ำจะส่งผลให้ตะกอนไฮดรอกไซด์มีประจุเป็นบวกและสามารถทำให้ศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ลดลง (Gregory and Duan, 2001) เช่น หมู่ฟีนอล และ คาร์บอกซีลิก ในสารประกอบอินทรีย์ โดยจะทำให้มีประจุเป็นกลางได้ด้วย $Al(OH)_2^+$ และ $Al(OH)^{2+}$ (Duan and Gregory, 2003) ในกรณีที่ค่า pH สูงกว่าค่าที่เหมาะสมจะทำให้เกิดประจุลบของ Al (Pernitsky and Edzwald, 2006) ดังนั้น การปรับค่า pH จึงส่งผลต่อการทำลายเสถียรภาพของ DOC (Bratby, 2006)

2.2 การหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์

ในการหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม ทำ Jar Test โดยปรับให้น้ำตัวอย่างมี pH ตั้งต้นตามสภาวะเหมาะสมที่หาได้จากการทดลองก่อนหน้า (pH 5.5) แปรผันปริมาณสารส้มที่ความเข้มข้น 30, 50, 60, 70, 80, 90 มิลลิกรัมต่อลิตร Figure 3 แสดงผลการกำจัดสารอินทรีย์ติดตามในรูปของ DOC UV_{254} และ SUVA โดยคำนวณปริมาณที่ถูกกำจัดเป็นร้อยละของค่าตั้งต้น จะเห็นว่าการแปรผันปริมาณสารส้มให้ผลการกำจัดแตกต่างกันไม่มากนัก ด้วยปริมาณสารส้มในช่วงของการทดลองทำให้ค่า DOC ลดลง 34.48-38.48% โดยที่ปริมาณสารส้ม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลให้ค่า DOC ลดลงได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสง UV_{254} (ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ปริมาณสารกลุ่ม aromatic และ NOM) พบว่ามีค่าลดลงในช่วง 66.78-73.97% โดยปริมาณสารส้ม 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ผลการกำจัดสูงสุด ทั้งนี้การตกตะกอนด้วยสารส้มมีผลให้ค่า SUVA ลดลงตามปริมาณ

สารส้มที่เพิ่มขึ้น (จาก 1.34 ในน้ำตั้งต้น เป็น 0.7-0.53 L/mg-m) แสดงว่าสารกลุ่ม aromatic ถูกกำจัดได้มากกว่าสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างอื่น ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษา Wang *et al.* (2013) ที่พบว่าสารส้มสามารถลดค่า DOC ได้ 37% โดยอธิบายว่าสารอินทรีย์ถูกกำจัดในกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้มด้วยกลไกการทำลายประจุ (Charge neutralization) และการดูดติดผิว (Adsorption-bridging)

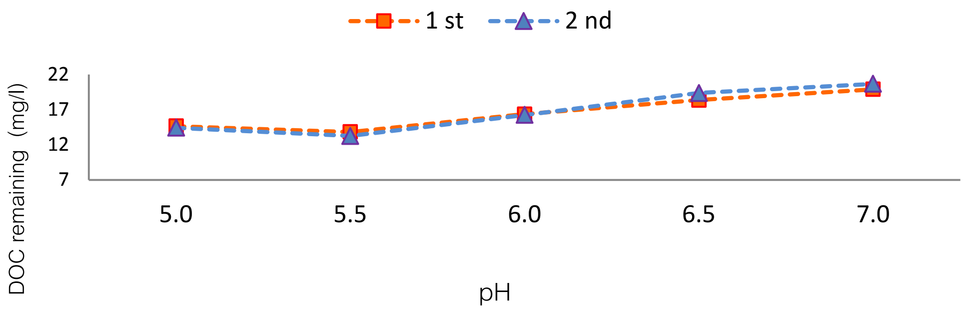


Figure 2 DOC remaining after coagulation with alum 30 mg/L at varying pH.

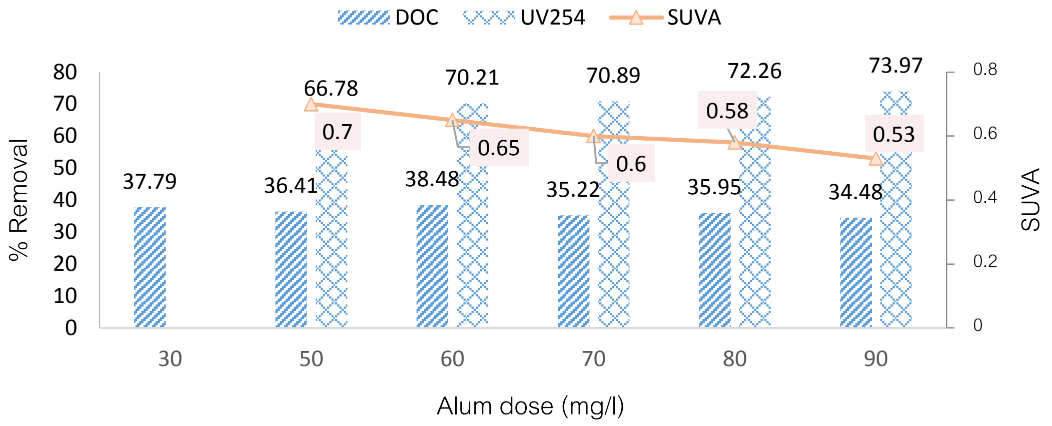


Figure 3 SUVA and Removal percentage of DOC, UV_{254} by coagulation with varying dose of alum at pH 5.5.

2.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ด้วย PAC

การทดลองในขั้นตอนนี้มีเป้าหมายเพื่อติดตามว่าการเติม PAC มีผลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์หรือไม่ โดยทำ Jar Test ในสภาวะ pH และ ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม (pH 5.5 สารส้ม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร) แปรผันปริมาณ PAC ที่ 40, 50, 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลที่แสดงใน Figure 4 แสดงให้เห็นว่าการเติม PAC ในกรณีน้ำตัวอย่างนี้ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยการตกตะกอนโดยสารส้ม DOC ลดลง 35.81, 37.92, 39.35% UV_{254} ลดลง 69.18, 69.52, 71.58% ตามลำดับ โดยที่ SUVA มีค่า 0.66, 0.66, 0.63 ตามลำดับ

ด้วยเหตุที่พื้นผิวของ PAC มีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุบวก (cationic functional groups) และ พื้นผิว NOM มีประจุเป็นลบ การเติม PAC จะช่วยให้กำจัด NOM ได้ดีขึ้น (Dastgheib *et al.*, 2004) ทั้งนี้ Park *et al.* (2019) พบว่า PAC ดูดติดสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำได้ดีและยังสามารถดูดติดสารขนาดอื่นด้วย แต่ยังมีประสิทธิภาพการ

ทำงานที่จำกัด ซึ่งสอดคล้องกับผลของการศึกษานี้ ที่พบว่าการใช้ PAC ร่วมด้วยจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

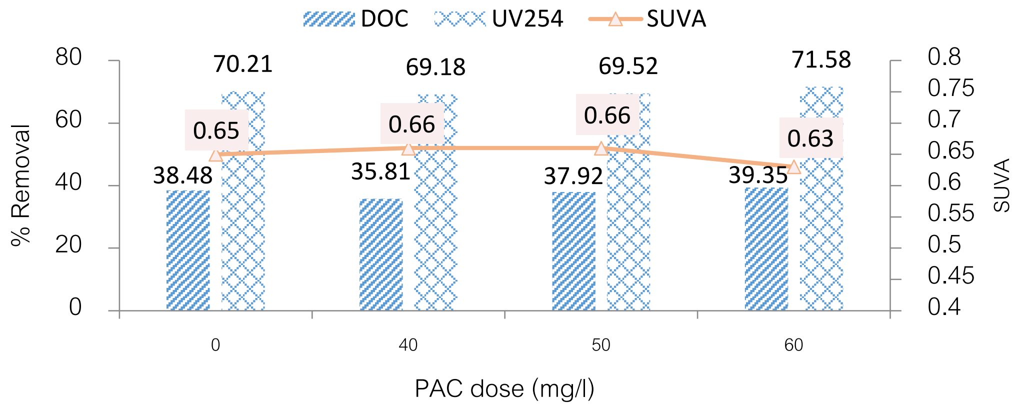


Figure 4 SUVA and Removal percentage of DOC, UV_{254} by coagulation (at pH 5.5, alum 60 mg/L) with varying dose of PAC.

สรุป

น้ำดิบสำหรับโรงผลิตน้ำประปาบางคล้า มีคุณสมบัติเป็นที่ยอมรับได้สำหรับการผลิตน้ำประปา มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ 21.78 mg DOC/L โดยตรวจพบสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) และองค์ประกอบของสารในกลุ่ม Humic-like Fulvic-like และ Tryptophan-like จากการทดสอบการตกตะกอน (Jar Test) ด้วยสารส้ม ซึ่งเป็นสภาวะเดียวกับที่ใช้ในสถานีผลิตน้ำจริง พบว่าสภาวะเหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ คือ pH 5.5 ปริมาณสารส้ม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลกำจัด DOC 38.48% NOM 70.21% ซึ่งกระบวนการ Coagulation-flocculation สามารถกำจัด NOM ได้ในระดับหนึ่ง โดยที่การเติม PAC ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการกำจัด DOC และ NOM

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการประปาส่วนภูมิภาค สาขาบางคล้า อ. บางคล้า จ. ฉะเชิงเทรา ที่อนุเคราะห์ข้อมูลระบบผลิตน้ำประปา สารส้มและตัวอย่างน้ำดิบที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

การประปาส่วนภูมิภาค. 2562 **รายงานผลการทดสอบคุณภาพน้ำประจำปี 2562 กปภ.สาขาบางคล้า.**

สำนักพัฒนาแหล่งน้ำขนาดใหญ่ กรมชลประทาน. 2558. **โครงการคลองสียัด จ. ฉะเชิงเทรา**, จาก http://lproject.rid.go.th/site/index.php/th/project-information/126-2015-06-22-01-59-56/172-2015-06-22-03-11-28, 20 กันยายน 2562

American Public Health Association. 2012. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** (22 nd ed.). Washington, DC.: American Public Health Association, American Water Works Association and the Water Environment Federation,.

Bieroza, M., A. Baker and J. Bridgeman. 2009. Relating freshwater organic matter fluorescence to organic carbon removal efficiency in drinking water treatment. **Sci Total Environ** 407(5): 1765-1774.

Bratby, J. 2006. **Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment**. London: IWA Publishing.

Dastgheib, S.A., T. Karanfil and W. Cheng. 2004. Tailoring activated carbons for enhanced removal of natural organic matter from natural waters. **Carbon** 42(3): 547-557.

Duan, J. and J. Gregory. 2003. Coagulation by hydrolysing metal salts. **Advances in Colloid and Interface Science** 100-102: 475-502.

Fabris, R., C.W. Chow, M. Drikas and B. Eikebrokk. 2008. Comparison of NOM character in selected Australian and Norwegian drinking waters. **Water Res** 42(15): 4188-4196.

Gregory, J. and J. Duan. 2001. Hydrolyzing metal salts as coagulants. **Pure and Applied Chemistry** 73(12): 2017-2026.

Matilainen, A., N. Lindqvist, S. Korhonen and T. Tuhkanen. 2002. Removal of NOM in the different stages of the water treatment process. **Environment International** 28(6): 457-465.

Matilainen, A., M. Vepsalainen and M. Sillanpaa. 2010. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review. **Adv Colloid Interface Sci** 159(2): 189-197.

Park, K.Y., Y.J., Yu, S.J. Yun and J.H. Kweon. 2019. Natural organic matter removal from algal-rich water and disinfection by-products formation potential reduction by powdered activated carbon adsorption. **J Environ Manage** 235: 310-318.

Pernitsky, D.J. and J.K. Edzwald. 2006. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua** 55(2): 121-141.

Qin, J.-J., M.H. Oo, K.A. Kekre, F. Knops and P. Miller. 2006. Impact of coagulation pH on enhanced removal of natural organic matter in treatment of reservoir water. **Separation and Purification Technology** 49(3): 295-298.

Wang, D., Y. Zhao, J. Xie, C.W.K. Chow and van J. Leeuwen. 2013. Characterizing DOM and removal by enhanced coagulation: A survey with typical Chinese source waters. **Separation and Purification Technology** 110: 188-195.

การประยุกต์ใช้การประมาณค่าเชิงพื้นที่เพื่อติดตามความเค็มในดิน พื้นที่ศึกษาลุ่มน้ำบางปะกงและแม่กลองตอนล่าง

Application of Spatial Interpolation for Soil Salinity Monitoring: A Case Study of Lower Bang Pakong and Mae Klong River Basins

เปรมศิริ คงเส้ง[1*] อรยา สมรูป[1] กนกศักดิ์ ชาญกล[1] และ ปริเวท วรรณโกวิท[1]

Premsiri Kongseng[1*], Oraya Somroop[1], Kanoksuk Chankon[1] and Pariwate Varnakovida[1]

บทคัดย่อ

ปัญหาการรุกล้ำของน้ำทะเลโดยเฉพาะพื้นที่ริมชายฝั่งอ่าวไทย ส่งผลให้ปริมาณความเค็มในแหล่งน้ำและในดินเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อพื้นที่เกษตรกรรมและการนำน้ำมาใช้อุปโภค-บริโภค การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามระดับความเค็มของดินในพื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกงและแม่กลองตอนล่าง การสำรวจภาคสนามเพื่อเก็บตัวอย่างและตรวจวัดความเค็มในดินดำเนินการ 2 ครั้ง ระหว่างวันที่ 29 ก.ค.-2 ส.ค. และ 28 ต.ค.-1 พ.ย. 2562 ที่ระดับความลึก 30 และ 100 ซม. โดยเลือกพื้นที่ตัวอย่าง 60 พื้นที่ต่อระดับความลึก ด้วยวิธีการสุ่มแบบแบ่งชั้นและการสุ่มอย่างเป็นระบบ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วย Semivariogram เพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าเชิงพื้นที่ จาก 4 แบบจำลองที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบ ได้แก่ Circular, Spherical, Exponential และ Gaussian จากนั้นทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่ด้วยวิธี Kriging ผลการศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมในการประมาณค่าความเค็มของดิน กรณีที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด คือ แบบจำลอง Gaussian และ Spherical ซึ่งมีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองน้อยกว่า 1 ลักษณะการกระจายตัวของความเค็มในดินแต่ละช่วงเวลามีความแตกต่างกัน และมีค่าสูงในบริเวณที่อยู่ใกล้แนวชายฝั่ง

ABSTRACT

Problems of saltwater intrusion in the coastal zone of the Gulf of Thailand resulting in increased salinity in water and soil which affects agricultural areas and water to use. This study evaluated several semivariogram models for the study of spatial distribution of soil salinity in lower Bang Pakong and Mae Klong river basins. Soil salinity tests were performed with two periods during 29 Sep - 2 Aug and 28 Oct - 1 Nov in 2019 at two levels of depth are 30 and 100 cm. Stratified and systematic sampling method were used to determine the location of measuring points. Totally 60 sampling points across both basins were selected. Suitable semivariogram model was selected from a comparison result of geostatistical analysis. Four models of semivariogram were compared: circular, spherical, exponential and Gaussian. Kriging interpolation method was used to estimating soil salinity values of unknown area. There is a clear gradient of soil salinity at both depths; higher along the shore and gradually decreases towards inland. Evaluation of semivariogram model performance reveals that the Gaussian model and spherical model were the best for estimating the salinity value in soil at 30 cm and 100 cm depth with smallest root mean square error (RMSE) that less than 1.

Key words: soil salinity, Bang Pakong and Mae Klong, kriging, semivariogram

* Corresponding author; e-mail address: **premsiri.mattana@gmail.com**

[1]ศูนย์วิศวกรรมสารสนเทศภูมิศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[1]KMUTT Geospatial Engineering and InnOvation Center, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

คำนำ

"ดินเค็ม" เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในหลายพื้นที่ของโลก เป็นผลมาจากความไม่สมดุลของสภาพแวดล้อมและอุทกวิทยา ทำให้เกิดการสะสมเกลือบริเวณผิวดินมากกว่าปริมาณเกลือที่ถูกชะล้างไป โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้ง และบางพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นและกึ่งร้อนชื้น (สมศรี, 2539) สภาพความเค็มที่เกิดขึ้นในดินส่งผลกระทบโดยตรงต่อระบบสิ่งแวดล้อมทั้งดินและน้ำ ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาดินเค็มในหลายพื้นที่ของประเทศ ได้แก่ บริเวณภาคกลาง และชายฝั่งทะเล เป็นต้น ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่มาจากลักษณะสภาพแวดล้อมของพื้นที่และกิจกรรมของมนุษย์ นอกจากนี้อาจมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศโลก อุณหภูมิสูงขึ้น น้ำแข็งขั้วโลกละลาย ทำให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้เกิดผลกระทบในหลายด้าน เช่น ด้านสุขภาพ การระบาดของโรค เป็นต้น อีกทั้งในด้านการเกษตร ทำให้ปริมาณผลผลิตทางการเกษตรลดลง เกิดการแย่งชิงน้ำเพื่อการชลประทาน เป็นต้น (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2549)

สถานการณ์การรุกล้ำของน้ำเค็ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่บริเวณริมชายฝั่งของอ่าวไทย อันเนื่องมาจากระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้น ปริมาณน้ำที่น้อยลงในฤดูแล้ง การนำน้ำไปใช้ในกิจกรรมทางการเกษตร และการสูบน้ำบาดาลสำหรับอุปโภคบริโภค (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2558) ส่งผลให้ปริมาณความเค็มในแหล่งน้ำผิวดินและใต้ดินเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลในด้านลบต่อเศรษฐกิจและสังคม เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวมีความสำคัญในด้านของการเป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่สำคัญของไทย หากความเค็มแพร่กระจายขึ้นมาบริเวณชั้นดินในระดับของรากพืช (root zone) ทำให้ดินมีค่าความเค็มสูงเกินค่ามาตรฐาน ซึ่งไม่เหมาะแก่การเพาะปลูก ดังนั้นปัญหาการรุกล้ำของน้ำเค็มจึงควรได้รับการติดตามอย่างใกล้ชิด และจำเป็นจะต้องมีข้อมูลประกอบที่มีความถูกต้อง แม่นยำ ทันสมัย เป็นมาตรฐานเดียวกัน สามารถระบุตำแหน่งเชิงพื้นที่ และระดับความรุนแรงของปัญหาได้

ในการติดตามและตรวจสอบการรุกล้ำของน้ำเค็ม จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการตรวจวัด ประมวลผล และแสดงผลข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยสามรถตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินด้วยเครื่องมือที่สามารถบันทึกข้อมูลได้อย่างอัตโนมัติ ร่วมกับการระบุพิกัดตำแหน่งในรูปแบบสถานีตรวจวัดในพื้นที่ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำมาประมวลและแสดงผลได้อย่างรวดเร็วในรูปแบบของข้อมูลเชิงพื้นที่และสามารถแสดงระดับความรุนแรงของปัญหา ปัจจุบันกรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้มีระบบเครือข่ายบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาล ด้วยการออกแบบให้มีสถานีสังเกตการณ์เพื่อตรวจวัดคุณลักษณะน้ำบาดาลโดยวิธีการทางสถิติแบบ kriging โดยสถานีจะส่งข้อมูลเข้าสู่ศูนย์ควบคุมหลักผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย สามารถแสดงผลเป็นพื้นที่การกระจายตัวของความเค็มในน้ำใต้ดินได้ แต่ยังไม่มีข้อมูลว่าความเค็มได้มีการแผ่กระจายขึ้นมาในระดับชั้นดินที่รากพืชอาศัยอยู่หรือไม่

ดังนั้นในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามสถานการณ์ความเค็มในดินของพื้นที่บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกงและแม่กลองตอนล่าง โดยอาศัยการวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) ของดินที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม ผ่านกระบวนการสถิติเชิงพื้นที่ ร่วมกับการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อแสดงผลขอบเขตพื้นที่และระดับความรุนแรงของการรุกล้ำของน้ำเค็มในดินในแต่ละช่วงเวลา

วิธีการศึกษา

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ คือ บริเวณตอนล่างของลุ่มน้ำแม่กลอง ได้แก่ กาญจนบุรี ราชบุรี นครปฐม สมุทรสาคร สมุทรสงคราม และตอนล่างของลุ่มน้ำบางปะกง ได้แก่ นครนายก ฉะเชิงเทรา ปราจีนบุรี และชลบุรี มีขนาดพื้นที่ประมาณ 15,762 ตร.กม. ลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำ และมีการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรวมของพื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ป่าไม้ เกษตรกรรม แหล่งน้ำ สิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2559) ซึ่งพื้นที่ศึกษาที่เลือกสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เป็นส่วนขยายต่อยอดจากงานวิจัยที่คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาไปแล้วในบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยาและท่าจีนตอนล่าง (Chankon *et al.*, 2019)

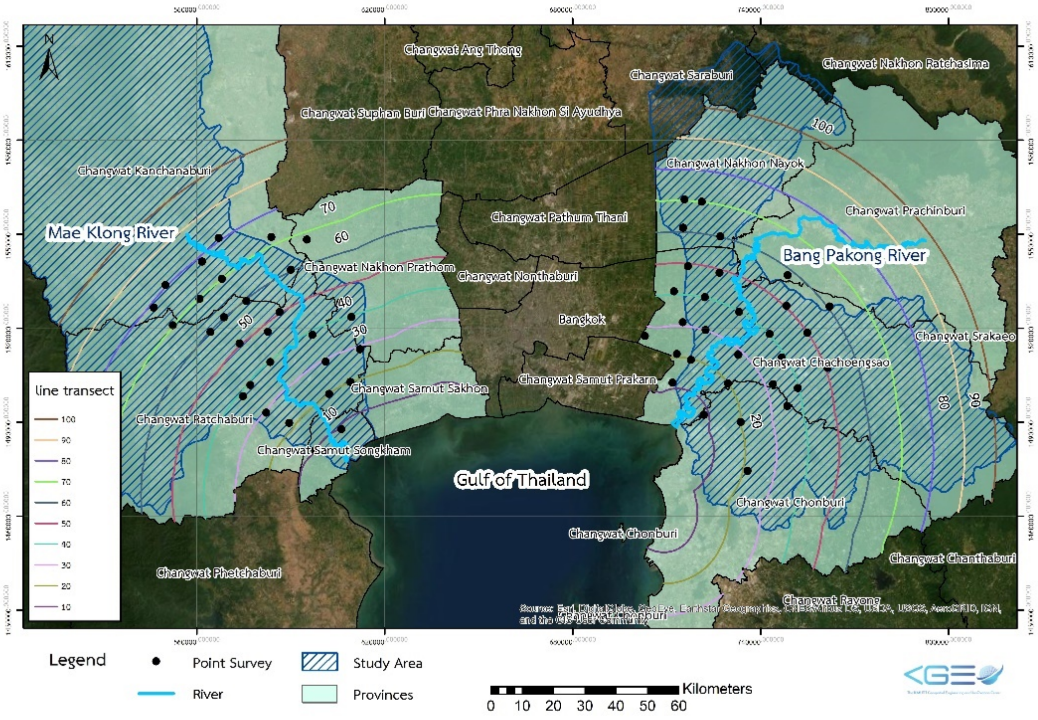


Figure 1 Study area and line transect for soil sampling.

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลทุติยภูมิ

สำหรับข้อมูลทุติยภูมิจะอาศัยการเก็บรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการปรับแก้ (Data correction) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและตรงตามความต้องการในการใช้งาน ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วยข้อมูล การใช้ประโยชน์ที่ดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558; 2559) ขอบเขตการปกครอง และถนน (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2555) และบ่อน้ำบาดาล (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2558)

ข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม

การสำรวจภาคสนามเพื่อเก็บตัวอย่างดิน โดยใช้วิธีการเก็บตัวอย่างแบบผสมระหว่างวิธีการสุ่มแบบแบ่งชั้นและการสุ่มอย่างเป็นระบบ (Stratified and Systematic Sampling Method) โดยกำหนดแนวเส้นเก็บข้อมูล (Line Transect) ให้มีระยะห่างจากแนวชายฝั่ง 80-100 กิโลเมตร และแบ่งเป็นระยะทุกๆ 10 กิโลเมตร (Figure 1)

จากนั้นทำการกำหนดจุดตรวจวัดบนแนวเส้นจำนวน 60 จุด แบ่งเป็นบริเวณตอนล่างของลุ่มน้ำแม่กลอง 30 จุด และบริเวณตอนล่างของลุ่มน้ำบางปะกง 30 จุด โดยแต่ละจุดจะเก็บตัวอย่างที่ 2 ระดับความลึก คือ 30 และ 100 ซม.

การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าของดินเบื้องต้น ด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity Meter: EC Meter) แบบตรวจวัดโดยตรง ซึ่งจะได้ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่กับจุดตรวจวัดบนพื้นที่ศึกษา จากนั้นทำการวิเคราะห์สถิติเชิงพื้นที่ด้วยแบบจำลอง Semivariogram ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของข้อมูลกับค่าอัตราความผันแปรระหว่างจุดที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางแต่ละจุด (lag distance) หาค่าความผันแปร (nugget) เพื่อใช้เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก โดยจะใช้สมการในการปรับแก้แบบจำลอง 4 สมการ ได้แก่ Circular, Spherical, Exponential และ Gaussian ซึ่งในแต่ละสมการจะมีค่าเริ่มต้นของค่าความผันแปรค่าที่ระดับของวาริโอแกรมสิ้นสุดลง หรือค่าเริ่มคงที่ (sill) และระยะจากระยะทางของแต่ละจุดไปถึง sill (range) แตกต่างกัน (Chang, 2002) และเพื่อให้สามารถแสดงผลข้อมูลในลักษณะของการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของความเค็มทั้งพื้นที่ศึกษา จะต้องทำการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านกระบวนการประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Spatial Interpolation) โดยการใช้ข้อมูลจุดที่ทราบค่าในการคำนวณหาค่าของข้อมูลจุดที่ไม่ทราบค่า และใช้การประมาณค่าเชิงพื้นที่ด้วยวิธีการ Kriging

การตรวจสอบค่าความถูกต้องของการประมาณค่าเชิงพื้นที่

เป็นขั้นตอนการเปรียบเทียบผลจากการประมาณค่าเชิงพื้นที่กับจุดที่ทราบค่าจริง เพื่อตรวจสอบระดับความถูกต้องของการประมาณค่าเชิงพื้นที่ โดยใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Root Mean Square Error หรือ RMSE) ในการเปรียบเทียบ เนื่องจากเป็นค่าที่สามารถวัดค่าทางสถิติของปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลค่าการนำไฟฟ้าของดินด้วยแบบจำลอง Semivariograme

จากการศึกษาและวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลค่าการนำไฟฟ้าในดิน จากข้อมูลภาคสนามจำนวน 2 ครั้ง ในช่วงระหว่างวันที่ 29 ก.ค.-2 ส.ค. และวันที่ 28 ต.ค.-1 พ.ย. 2562 บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกงและแม่กลองตอนล่าง ที่ 2 ระดับความลึก คือ 30 และ 100 ซม. ด้วยแบบจำลอง Semivariograme และทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของแต่ละแบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการกระบวนการประมาณค่าเชิงพื้นที่ พบว่า ในพื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกงช่วงระหว่างวันที่ 29 ก.ค.-2 ส.ค.ที่ทั้ง 2 ระดับความลึก คือ แบบจำลอง Gaussian ซึ่งมีค่า RMSE เท่ากับ 1.53 และ 1.57 ตามลำดับ (Table 1, Figure 2) สำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองที่ระดับความลึก 30 และ 100 ซม. คือ แบบจำลอง Spherical และ Exponential ซึ่งมีค่า RMSE เท่ากับ 0.01 และ 1.15 ตามลำดับ (Table 2, Figure 2)

ในขณะที่ในพื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกงในช่วงระหว่างวันที่ 28 ต.ค.-1 พ.ย.ที่ระดับความลึก 30 และ 100 ซม. คือแบบจำลอง Gaussian และ Spherical ซึ่งมีค่า RMSE เท่ากับ 0.98 และ 0.90 ตามลำดับ (Table 1, Figure 2) สำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลองที่ทั้ง 2 ระดับความลึก คือ แบบจำลอง Spherical ซึ่งมีค่า RMSE เท่ากับ 0.68 และ 2.26 ตามลำดับ (Table 2, Figure 2)

Tabel 1 Prediction error for selected semivariogram models (Bang Pakong).

Depth (cm.)	Prediction Error	1st Survey				2nd Survey			
		Cir	Sph	Exp	Gau	Cir	Sph	Exp	Gau
30	Mean	0.0153	0.0037	0.0004	0.0099	0.0100	0.0064	0.0065	0.0105
	Root Mean Square	1.5682	1.5685	1.6022	1.5279	1.0006	1.0114	1.0555	0.9831
	Mean Standardized	0.0062	-0.0008	-0.0022	0.0025	0.0056	0.0026	0.0042	0.0047
	Root Mean Square Standardized	0.9914	0.9834	0.9785	0.9861	1.0255	1.0367	1.0961	1.0127
	Average Standard Error	1.5911	1.6032	1.6519	1.5502	0.9917	0.9908	0.9878	0.9872
100	Mean	0.0315	0.0260	0.0251	0.0402	0.0312	0.0279	0.0401	0.0129
	Root Mean Square	1.5930	1.5918	1.5927	1.5861	0.8998	0.8954	0.8978	0.9291
	Mean Standardized	0.0084	0.0053	0.0049	0.0128	0.0148	0.0113	0.0208	-0.0028
	Root Mean Square Standardized	0.9567	0.9597	0.9676	0.9593	0.9679	0.9679	0.8910	0.9900
	Average Standard Error	1.7004	1.6946	1.6966	1.6886	0.9342	0.9308	0.8910	0.9416

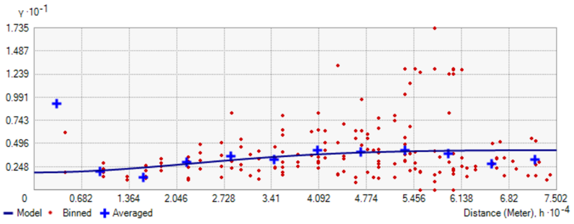
Cir = Circular Sph = Spherical Exp = Exponential Gau = Gaussian

Tabel 2 Prediction error for selected semivariogram models (Mae Klong).

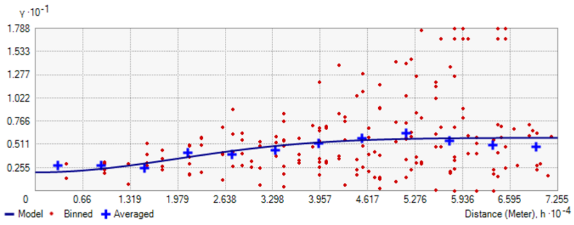
Depth (cm.)	Prediction Error	1st Survey				2nd Survey			
		Cir	Sph	Exp	Gau	Cir	Sph	Exp	Gau
30	Mean	-0.0501	-0.0003	-0.0631	-0.0520	-0.0166	-0.0198	-0.0285	-0.0599
	Root Mean Square	1.4644	0.0129	1.4490	1.4597	0.6814	0.6756	0.6793	0.7321
	Mean Standardized	-0.0335	-0.0009	-0.0397	-0.0338	0.0056	-0.0161	-0.0278	-0.0938
	Root Mean Square Standardized	1.1070	0.1397	1.0836	1.1012	1.1759	1.1954	0.9661	1.4474
	Average Standard Error	1.2982	0.0862	1.3129	1.3010	0.5729	0.5567	0.6797	0.5332
100	Mean	-0.0235	-0.0441	-0.0399	-0.0440	-0.0257	-0.0300	-0.0453	-0.0084
	Root Mean Square	1.1760	1.1768	1.1542	1.1713	2.2625	2.2624	2.2651	2.2673
	Mean Standardized	-0.0151	-0.0318	-0.0265	-0.0313	-0.0084	-0.0106	-0.0181	0.0007
	Root Mean Square Standardized	0.9895	0.9789	-0.0265	0.9740	1.1287	1.1271	1.1245	1.1391
	Average Standard Error	1.1894	1.1940	1.1882	1.1987	1.9755	1.9787	1.9870	1.9579

Cir = Circular Sph = Spherical Exp = Exponential Gau = Gaussian

1st Survey

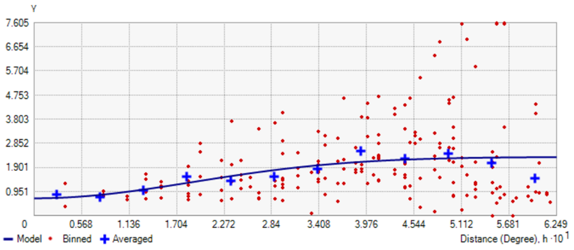


Semivariogram of Gaussian Model at 30 cm. Depth

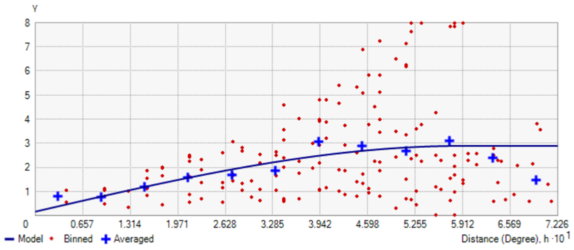


Semivariogram of Gaussian Model at 100 cm. Depth

2nd Survey



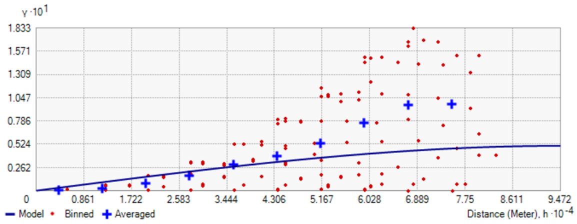
Semivariogram of Gaussian Model at 30 cm. Depth



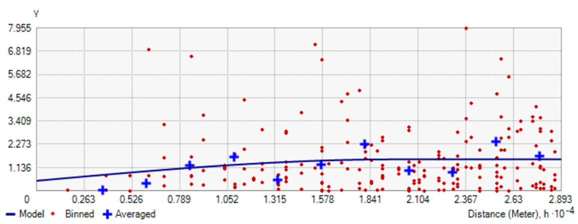
Semivariogram of Spherical Model at 100 cm. Depth

a.) Bang Pakong River Basin

1st Survey

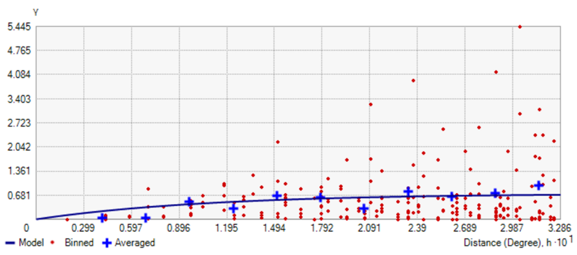


Semivariogram of Spherical Model at 30 cm. Depth

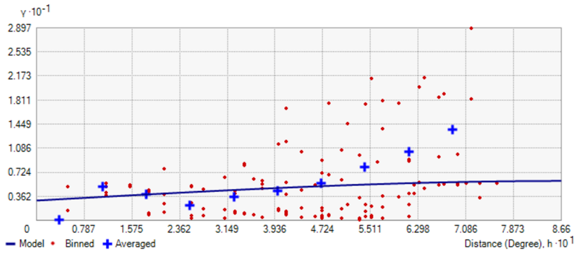


Semivariogram of Spherical Model at 100 cm. Depth

2nd Survey



Semivariogram of Exponentail Model at 30 cm. Depth



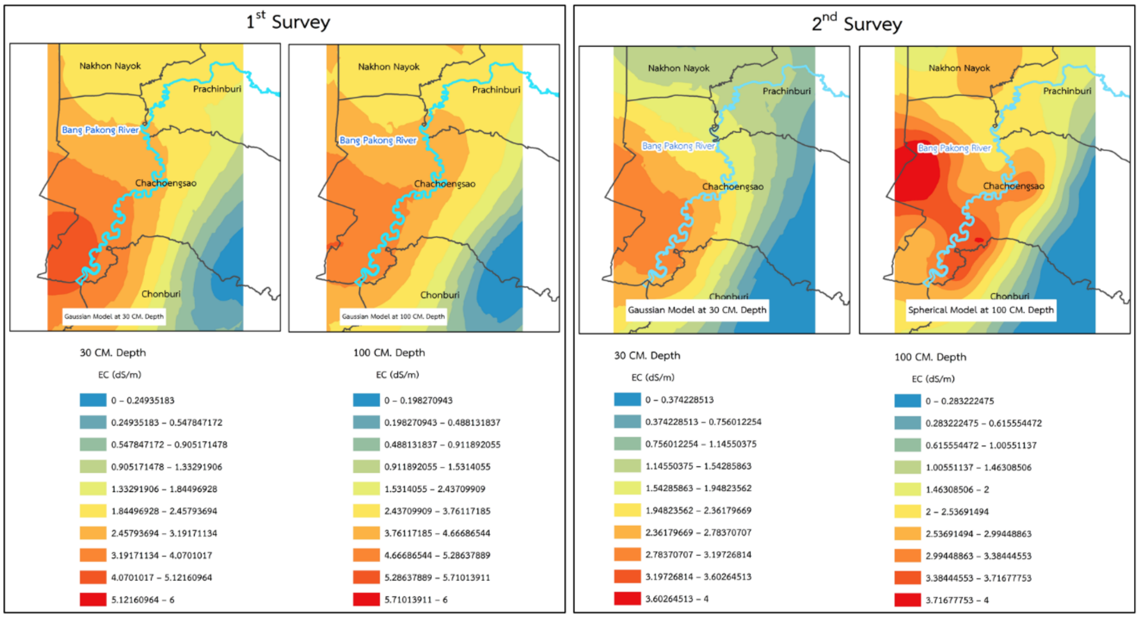
Semivariogram of Spherical Model at 100 cm. Depth

b.) Mae Klong River Basin

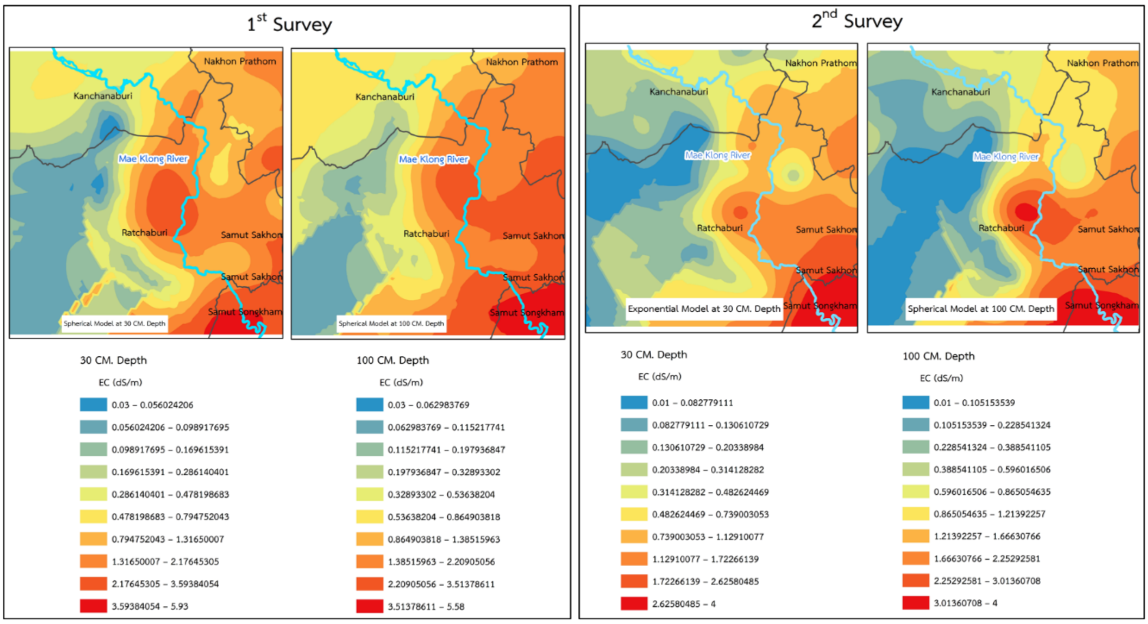
Figure 2 Semivariogram shows the variance between data points that change according to distance.

การประมาณค่าความเค็มของดินด้วยวิธี Kriging Interpolation

เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าเชิงพื้นที่ในแต่ละชุดข้อมูลแล้ว ทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของชุดข้อมูลต่างๆ ด้วยวิธีการ kriging interpolation ซึ่งได้ข้อมูลการกระจายตัวของความความเค็มของดินในพื้นที่ต่างๆ แสดงดัง Figure 3



a.) Bang Pakong River Basin



b.) Mea Klong River Basin

Figure 3 Estimation of the distribution of EC in soil using the kriging method.

สรุปผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) ด้วยแบบจำลอง Semivariograme พบว่า ในช่วงระหว่างวันที่ 29 ก.ค.-2 ส.ค. 2562 แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นที่บริเวณลุ่มน้ำบางปะกง ที่ทั้งสองระดับ คือ แบบ Gaussian ส่วนพื้นที่บริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง คือ แบบจำลอง Spherical และ Exponential ตามลำดับ และในช่วงระหว่างวันที่ 28 ต.ค.-1 พ.ย. 2562 แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นที่บริเวณลุ่มน้ำบางปะกง ที่ระดับความลึก 30 และ 100 ซม. คือ แบบจำลอง Gaussian และ Spherical ส่วนพื้นที่บริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง คือ แบบจำลอง Spherical ตามลำดับ ทั้งนี้แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละพื้นที่จะมีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอด ขึ้นอยู่กับค่าความแปรปรวนของชุดข้อมูลที่ทำการศึกษาในแต่ละครั้ง

และจากการประมาณค่าการกระจายตัวของค่าการนำไฟฟ้าในดินด้วยวิธีการแบบ Kriging พบว่าในช่วงระหว่างวันที่ 29 ก.ค.-2 ส.ค. 2562 จะมีค่าการนำไฟฟ้าของดินทั้งบริเวณลุ่มน้ำบางปะกงและแม่กลองที่ต่ำกว่าในช่วงระหว่างวันที่ 28 ต.ค.-1 พ.ย. 2562 เนื่องจากช่วงปลายเดือน ก.ค. เป็นช่วงกลางของฤดูฝน มีปริมาณของน้ำในแม่น้ำลำคลองมาก อีกทั้งยังมีฝนตกลงมาช่วยชะล้างความเค็มของดิน ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินในช่วงนี้มีค่าไม่สูงมากเท่ากับช่วงปลายเดือน ต.ค. ซึ่งเป็นช่วงต้นของฤดูหนาว แต่อย่างไรก็ตามบริเวณริมฝั่งแม่น้ำทั้ง 2 สายนี้ มีค่าการนำไฟฟ้าของดินที่สูงขึ้นในระดับความลึก 100 ซม. เนื่องจากยิ่งชั้นดินลึกลงไปจะมีการแทรกซึมของน้ำทะเลเข้ามาชั้นน้ำบาดาล จึงมีการสะสมของเกลือมากขึ้น ส่งผลให้ดินที่มีระดับความลึกมากกว่ามีความเค็มมากกว่าดินที่อยู่ในระดับที่ตื้นกว่า

ในขณะเดียวกันพื้นที่บริเวณลุ่มน้ำบางปะกงจะมีค่าความเค็มในดินสูงกว่าและมีการกระจายตัวของความเค็มในดินเป็นบริเวณกว้างกว่าพื้นที่บริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง เนื่องจากพื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกงมีความลาดชันต่ำกว่าพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง ส่งผลให้น้ำทะเลสามารถหนุนขึ้นไปได้สูงกว่า และเกิดการสะสมของชั้นเกลือในดินได้มากกว่า ด้วยเหตุผลนี้จึงส่งผลให้ดินในบริเวณลุ่มน้ำบางปะกงเป็นดินที่เค็มกว่าในบริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง

กิตติกรรมประกาศ

งานศึกษาครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยภายใต้แผนงานวิจัยเรื่อง “การประเมินสถานการณ์ความเค็มของน้ำในแม่น้ำ และของดินในพื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกงและแม่กลอง จากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล” ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์การมหาชน) (BEDO) และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (NRCT) ปีงบประมาณ 2562 และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และสาธารณูปโภคต่างๆ ตลอดการทำงานศึกษาวิจัยชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2550. **ข้อมูลการจัดการดิน**, จาก http://www.ldd.go.th/Web_Soil/salty.htm#7 22 กรกฎาคม 2562.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. 2558. **รายงานโครงการวางเครือข่ายสถานีสังเกตการณ์น้ำบาดาลเพื่อติดตามสถานการณ์น้ำบาดาล.** สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล.

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2559. **ผลิตภัณฑ์ภาคและจังหวัดแบบปริมาณลูกโซ่ ฉบับ พ.ศ. 2559**, จาก http://www.nesdb.go.th/main.php?filename=gross_regional, 13 กรกฎาคม 2562.

สมศรี อรุณินท์. 2539. ดินเค็มในประเทศไทย. กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ

Chankon, K., S. Iabchoon, P. Varnakovida and A. Chidthaisong. 2019. Evaluation of semivariogram models in the study of spatial interpolation of soil salinity, pp. 186-192. *In* **Proceeding of the THA 2019 International Conference on Water Management and Climate Change towards Asia's Water-Energy-Food Nexus and SDGs.** 22-25 January 2019, Water Resources System Research Unit, Bangkok, Thailand.

Chang, Kang-tsung. 2002. Introduction to Geographic Information Systems. New York: McGraw Hill Higher Education.

ความคิดเห็นขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้

Forest Industry Organization Opinions on Development of Logging Machinery Power Sources

ชัยฉัตร ฉัตรศุภกุล[1*] วันชัย อรุณประภารัตน์[2] และ ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล[2]

Chaichat Chatsupakul[1*], Wanchai Arunpraparut[2] and Laddawan Rianthakool[2]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับความคิดเห็นขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ที่มีต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นนี้ รวบรวมข้อมูลโดยแบบสัมภาษณ์ 9 ชุดจากผู้บริหาร และแบบสอบถาม 81 ชุดจากการสุ่มตัวอย่างของหัวหน้างานสวนป่า ใช้การวิเคราะห์เชิงพรรณนาและการวิเคราะห์ทางสถิติไคสแควร์ (Chi-square) กำหนดนัยสำคัญทางสถิติไว้ที่ระดับ 0.05 ผลการศึกษาพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นด้วยในระดับมากกับการทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในด้วยพลังงานจากไฟฟ้าในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นที่มีต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ระดับความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้ และระดับความคิดเห็นต่อปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้และ/หรือเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้ ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจในกรณีผลิตเครื่องจักรกลไฟฟ้าในการทำไม้ใหม่เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ABSTRACT

The objectives of this study were to know the opinions level of the Forest Industry Organization on the development of logging machinery power sources for reducing the environmental impacts and to find the related factors on these opinions. There were 9 interviews from administrators and 81 respondents from samples of forest plantation chief. Descriptive analysis and Chi-Square testing were used to analyses with the statistical significance level at 0.05. As a result, it was found that the respondents agreed with a high level in the replacement of energy from fossil fuel to the electrical energy to reduce the environmental impacts. The factors related to opinion levels on the development of logging machinery power sources to reduce the environmental impacts were logging machinery development knowledge levels and factors influencing the logging machinery purchased and/or used opinion levels. The results could be used to determine in case of the new electrical logging machinery production to reduce the environmental impacts.

Key words: Opinion, Logging Machinery, Machine Development, Forest Industry Organization

* Corresponding author; e-mail address: nui1newtec@gmail.com

[1]สาขาวิชาการบริหารทรัพยากรป่าไม้และสิ่งแวดล้อม คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Forest Resource and Environmental Administration, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department Of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การเผาเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่เป็นต้นกำเนิดพลังงานในเครื่องจักรกลเป็นจำนวนมากทั่วโลก ปลดปล่อยไอเสียทิ้งไปในบรรยากาศ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ก๊าซเรือนกระจกผิดปกติ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2559) เกิดสภาวะโลกร้อน และ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในไอเสีย เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลกระทบไปทั่วโลกจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนไป ระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น เกิดการผันผวนของฤดูกาล และภัยพิบัติทางธรรมชาติที่รุนแรง ทั่วโลกตระหนักถึงความเสี่ยงที่จะเกิดภัยพิบัติและอันตรายต่างๆ ทำให้มีนโยบายและมาตรการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไปพร้อมกับ รักษาปริมาณในระดับความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกให้คงที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้เกิดขึ้น โดยองค์การสหประชาชาติเสนอ เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals; SDGs) 17 เป้าหมาย กำหนดให้เป้าหมายที่ 13: การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Action) รองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและผลกระทบ ด้วยนโยบาย กลยุทธ์ มาตรการที่เหมาะสม และทันสมัย สร้างความตระหนักรู้และบูรณาการไปในสมาชิกทั่วโลก (United Nations Development Programme, 2015) ในประเทศไทยได้ตอบสนองนโยบายขององค์การสหประชาชาติด้วย ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี เตรียมพร้อมและเพิ่มขีดความสามารถในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ บริหารจัดการเพื่อลดความเสี่ยงด้านภัยพิบัติทางธรรมชาติ รวมทั้งรับภาระในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การพัฒนาเครื่องจักรกลในปัจจุบัน เมื่ออ้างอิงกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนเพื่อแก้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในโลกให้ลดลง จึงมุ่งหมายแทนที่พลังงานจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในอันเป็นสาเหตุหลักด้วยพลังงานจากไฟฟ้าโดยเครื่องจักรกลไฟฟ้า เครื่องจักรกลในการทำไม้ (Logging Machinery) ที่ใช้ในการล้มไม้ ชักลาก รวมหมอน ขนส่งระยะใกล้ และขนส่งระยะไกล ประกอบด้วย เลื่อยยนต์ เครื่องกว้าน รถคีบไม้ รถยกไม้ รถแทรกเตอร์ รถสกิดเดอร์ รถเครน รถจอหนัง รถบรรทุก รถบรรทุกกึ่งพ่วงแบบสาลี่ รถบรรทุกแบบพ่วง (อำนวย, 2524, 2526, 2529) เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องจักรกลในโลกที่มีเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นส่วนประกอบ จึงมีแนวทางการพัฒนาในรูปแบบเดียวกัน ทำให้ผู้ศึกษาวิจัยสนใจการพัฒนาเครื่องจักรกลที่ใช้พลังงานจากไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการบรรเทาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นำไปสู่การศึกษาความคิดเห็นในการพัฒนาเครื่องจักรกล ในหัวข้อเรื่อง ความคิดเห็นขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ มีขอบเขตการศึกษาที่องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ (อ.อ.ป. หรือ FIO) ซึ่งเป็นผู้ประกอบการด้านการทำไม้ที่มีพื้นที่มากที่สุดในประเทศไทย และใช้เครื่องจักรกลที่เป็นทรัพย์สินขององค์กรเองในการทำไม้ (สำนักงานคณะกรรมการข้อมูลข่าวสารของราชการ, 2559) มีความชัดเจนในระบบการบริหารงานขององค์กร และมีความเหมาะสม สอดคล้องกับงานศึกษาวิจัยครั้งนี้ โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาระดับความคิดเห็นขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ที่มีต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ที่มีต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

สมมติฐานในการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาในการปฏิบัติงานด้านการทำไม้มีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ประสบการณ์ทำงานในฝ่ายทำไม้ของงานสวนป่ามีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ประสบการณ์ใช้เครื่องจักรกลในการทำไม้มีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ระดับความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้มีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ และระดับความคิดเห็นต่อ

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้และ/หรือเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้มีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้

อุปกรณ์และวิธีการ

รวบรวมข้อมูลจากองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ โดยการสัมภาษณ์ผู้บริหาร 9 ท่าน ได้แก่ ผู้อำนวยการองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ 1 ท่าน รองผู้อำนวยการองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ 3 ท่าน ผู้อำนวยการสำนักองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ 5 ท่าน และการตอบแบบสอบถามของหัวหน้างานสวนป่าองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ 81 ตัวอย่าง จากจำนวนประชากร 102 ท่าน โดยการหาจำนวนตัวอย่างด้วยวิธีของ Krejcie and Morgan (1970) และสุ่มตัวอย่างแบบชั้นภูมิ (Stratified random sampling) แบ่งกลุ่มการสุ่มตัวอย่างตามพื้นที่ในการทำไม้ขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ โดยวิธีการจับสลากตามจำนวนสัดส่วนที่คำนวณได้ ได้แก่ ภาคเหนือบน 24 ตัวอย่างจาก 30 งานสวนป่า ภาคเหนือล่าง 14 ตัวอย่างจาก 18 งานสวนป่า ภาคกลาง 13 ตัวอย่างจาก 16 งานสวนป่า ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 17 ตัวอย่างจาก 21 งานสวนป่า และภาคใต้ 13 ตัวอย่างจาก 17 งานสวนป่า การวัดระดับความคิดเห็นใช้มาตรวัดตามแบบของ Likert's Scale 5 ระดับ และนำคะแนนมาจัดแบ่งอันตรภาคชั้นออกเป็น 2 ชั้นในระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ได้แก่ เห็นด้วยในระดับมากและเห็นด้วยในระดับน้อย และ 3 ชั้นในระดับความคิดเห็นต่อปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้และ/หรือเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้ ได้แก่ เห็นด้วยในระดับมาก เห็นด้วยในระดับปานกลาง และเห็นด้วยในระดับน้อยตามลำดับ

ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ เมื่อรวบรวมแล้วนำมาสรุปและวิเคราะห์เชิงพรรณนาโดยแยกประเด็นวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน คือ แนวนโยบายขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ต่อการพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้ ปัจจัยในการตัดสินใจเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้ และแนวโน้มในการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ไปใช้พลังงานจากไฟฟ้าแทนการใช้เชื้อเพลิงเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อมูลจากการตอบแบบสอบถาม เมื่อรวบรวมแล้วนำมาวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติสำเร็จรูป การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การวิเคราะห์ทางสถิติเชิงพรรณนา เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไป และระดับความคิดเห็นของหัวหน้างานสวนป่าตัวอย่าง

2. การวิเคราะห์ทางสถิติเชิงอนุมาน เป็นการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อระดับความคิดเห็นของหัวหน้างานสวนป่าตัวอย่าง เพื่อทดสอบสมมติฐานการศึกษา โดยใช้วิธีวิเคราะห์ทางสถิติไคสแควร์ (Chi-square) กำหนดนัยสำคัญทางสถิติไว้ที่ระดับ 0.05 ($\alpha = 0.05$)

การนำเสนอข้อมูลอยู่ในรูปคำอธิบาย และ ตารางประกอบคำอธิบาย แสดงค่าทางสถิติที่สำคัญ

ผลและวิจารณ์

ผลการสัมภาษณ์

การสัมภาษณ์ผู้บริหารตามหัวข้อในแบบสัมภาษณ์ที่ประกอบด้วย เครื่องจักรกลในการทำไม้ การพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้ การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และปัจจัยในการเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้ รวบรวมและแบ่งประเด็นวิเคราะห์ออกเป็น 3 ประเด็น ได้แก่

ประเด็นที่ 1 : แนวนโยบายขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ต่อการพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้

ผู้บริหารทั้งหมดให้ความสำคัญ ด้านต้นทุนการผลิต องค์อุตสาหกรรมป่าไม้ต้องการผลกำไรเพื่อการบริหารองค์กร การพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้ ต้องคำนึงถึงต้นทุนของเครื่องจักรกล ประสิทธิภาพในการทำงาน ค่าใช้จ่ายในการใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเพื่อให้เหมาะสมและคุ้มค่ากับการทำไม้ บนพื้นฐานของการอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์ทรัพยากรธรรมชาติ รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ประเด็นที่ 2 : ปัจจัยในการตัดสินใจเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้

1. ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักรกล เป็นปัจจัยที่ผู้บริหารเลือกใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อมากที่สุดเป็นลำดับแรก

2. ผู้แทนจำหน่ายของเครื่องจักรกลและบริการหลังการขาย เป็นปัจจัยที่ผู้บริหารเลือกใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อมากรองลงมาเป็นลำดับที่สอง

3. ราคาของเครื่องจักรกลที่เหมาะสม เป็นปัจจัยที่ผู้บริหารเลือกใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อมากเป็นลำดับที่สาม

นอกจากนี้ อะไหล่ราคาถูกหาซื้อง่าย มีความแข็งแรงทนทาน ประหยัดพลังงาน/เชื้อเพลิง มีเทคโนโลยีสมัยใหม่ ยังเป็นปัจจัยที่ถูกเลือกประกอบการตัดสินใจเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้

ประเด็นที่ 3 : แนวโน้มในการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ไปใช้พลังงานจากไฟฟ้าแทนการใช้เชื้อเพลิงเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

โดยรวมผู้บริหารมีความเห็นว่า การทำไม้มีแนวโน้มที่จะใช้เครื่องจักรกลที่ใช้ไฟฟ้าในอนาคตเพราะเกิดผลดีต่อการรักษาสิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนการผลิตจากการไม่ใช้เชื้อเพลิง ปัจจุบันการทำไม้ยังไม่มีการใช้เครื่องจักรกลที่เป็นไฟฟ้า องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ยังไม่มีข้อมูลในการตัดสินใจเลือกซื้อ แต่หากเกิดการพัฒนาสำหรับการทำไม้ของงานสวนป่า ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรกลขนาดใหญ่สำหรับล้มไม้เนื่องจากไม้มีขนาดเล็ก ผู้ผลิตควรคำนึงถึงแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้า การพัฒนาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ให้ใช้ได้นาน ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักรกล อะไหล่และอุปกรณ์ รวมถึงต้องพัฒนาบุคลากรที่ใช้เครื่องจักรกลเพิ่มเติม ในอนาคตจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร เกี่ยวข้องกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เกี่ยวกับผลประโยชน์ที่จะได้รับและผลกระทบที่จะเกิดขึ้น

ผลการตอบแบบสอบถาม

การตอบแบบสอบถามโดยหัวหน้างานสวนป่าตามหัวข้อในแบบสอบถามที่ประกอบด้วย ข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม ประสบการณ์ในการทำไม้ ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลในการทำไม้ ความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ และความคิดเห็นต่อปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้ และ/หรือ เลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้ รวบรวมและแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การวิเคราะห์ทางสถิติเชิงพรรณนา ของ ข้อมูลทั่วไป และ ระดับความคิดเห็นของหัวหน้างานสวนป่า

1.1 ข้อมูลทั่วไป เพศ เป็นเพศชาย ร้อยละ 98.8 และเพศหญิง ร้อยละ 1.2, อายุ มีอายุ 36-40 ปี ร้อยละ 40.7 รองลงมา อายุ 41-45 ปี ร้อยละ 35.8 อายุ 30-35 ปี ร้อยละ 21.0 และอายุ 46-50 ปี ร้อยละ 2.5 ตามลำดับ, ระดับการศึกษา เป็นผู้มีระดับการศึกษาในระดับปริญญาตรี ร้อยละ 85.2 รองลงมา สูงกว่าปริญญาตรี ร้อยละ 12.3 และต่ำกว่าปริญญาตรี ร้อยละ 2.5 ตามลำดับ, ระยะเวลาการปฏิบัติงานที่องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ ปฏิบัติงานมากกว่า 15 ปี ร้อยละ 43.2 รองลงมา ปฏิบัติงาน 10-15 ปี ร้อยละ 38.3 และปฏิบัติงานต่ำกว่า 10 ปี ร้อยละ 18.5 ตามลำดับ, ระยะเวลาดำรงตำแหน่งหัวหน้างานสวนป่า ดำรงตำแหน่งน้อยกว่า 5 ปี ร้อยละ

45.6 รองลงมา ดำรงตำแหน่ง 11-15 ปี ร้อยละ 30.9 ดำรงตำแหน่ง 5-10 ปี ร้อยละ 21.0 และดำรงตำแหน่งมากกว่า 15 ปี ร้อยละ 2.5 ตามลำดับ, ระยะเวลาในการปฏิบัติงานด้านการทำไม้ มีการปฏิบัติงานด้านการทำไม้ 11-15 ปี ร้อยละ 32.1 รองลงมา มีการปฏิบัติงานด้านการทำไม้ 5-10 ปี ร้อยละ 29.6 มีการปฏิบัติงานด้านการทำไม้น้อยกว่า 5 ปี ร้อยละ 22.2 และการปฏิบัติงานด้านการทำไม้มากกว่า 15 ปี ร้อยละ 16.0 ตามลำดับ, ประสบการณ์ทำงานในฝ่ายทำไม้ของงานสวนป่าใน 5 ฝ่าย (ล้มไม้ ชักลาก รวมหมอน ขนส่งระยะใกล้ และขนส่งระยะไกล) มีประสบการณ์ทำไม้ทั้ง 5 ฝ่าย ร้อยละ 59.3 รองลงมา มีประสบการณ์ทำไม้ 4 ฝ่าย ร้อยละ 21.0 มีประสบการณ์ทำไม้ 3 ฝ่าย ร้อยละ 8.6 ไม่มีประสบการณ์ทำไม้ ร้อยละ 6.2 และมีประสบการณ์ทำไม้ 1 ฝ่าย ร้อยละ 1.2 ตามลำดับ, ประสบการณ์ใช้เครื่องจักรกลในการทำไม้ มีประสบการณ์ใช้เครื่องจักรกลในการทำไม้มากกว่า 7 ชนิด ร้อยละ 48.1 รองลงมา มีประสบการณ์ใช้เครื่องจักรกลในการทำไม้ 4-7 ชนิด ร้อยละ 30.9 และมีประสบการณ์ใช้เครื่องจักรกลในการทำไม้น้อยกว่า 4 ชนิด ร้อยละ 21.0 ตามลำดับ, การสร้าง ปรับปรุง หรือดัดแปลงเครื่องจักรกลในการทำไม้ใช้เอง ไม่มีการสร้าง ปรับปรุง หรือดัดแปลง ร้อยละ 74.1 และมีการสร้าง ปรับปรุง หรือดัดแปลง ร้อยละ 25.9 ได้แก่ ใช้รถแทรกเตอร์ในการชักลากไม้ ต่อกระบะ ต่อเครน รถแทรกเตอร์ล้อยางติดเขี้ยวหมาหรือแขนยก รถสิบล้อทำเป็นจอหนังใช้ระบบวินซ์ไม้ขึ้นรถ รถบรรทุกหกล้อติดเครนยกไม้ รถคีบไม้ รถจอหนัง รถเครน รถยกไม้ เหล็กยกท้ายรถแทรกเตอร์ล้อยาง และเลื่อยยนต์, การเปลี่ยนแปลงต้นกำเนิดพลังงานจากเครื่องยนต์สันดาปภายในไปเป็นพลังงานจากไฟฟ้าในเครื่องจักรกลในการทำไม้ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ร้อยละ 96.3 และมีการเปลี่ยนแปลง ร้อยละ 3.7 ซึ่งอยู่ในระหว่างการดำเนินการ, ระดับความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้ มีความรู้ในระดับปานกลาง (9.68-14.35 คะแนน) ร้อยละ 51.9 รองลงมา มีความรู้ระดับน้อย (5.00-9.67 คะแนน) ร้อยละ 24.7 และมีความรู้ระดับมาก (14.36-19.00 คะแนน) ร้อยละ 23.5 ตามลำดับ, ระดับความคิดเห็นต่อปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้และ/หรือเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้ มีความคิดเห็น เห็นด้วยในระดับมาก (4.29-5.00) ร้อยละ 48.1 รองลงมา เห็นด้วยในระดับปานกลาง (3.58-4.28) ร้อยละ 35.8 และเห็นด้วยในระดับน้อย (2.86-3.57) ร้อยละ 16.1 ตามลำดับ

1.2 **ระดับความคิดเห็นของหัวหน้างานสวนป่า** มีระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ เห็นด้วยในระดับมาก (3.66-4.75) ร้อยละ 71.6 และเห็นด้วยในระดับน้อย (2.55-3.65) ร้อยละ 28.4 ดังแสดงไว้ใน Table 1

Table 1 Frequency and percentage of logging machinery power sources development opinion levels.

logging machinery power sources development opinion levels	Frequency	Percent
Low (2.55 – 3.65)	23	28.4
High (3.66 – 4.75)	58	71.6
Total	81	100.0

2. การวิเคราะห์ทางสถิติเชิงอนุมาน ของ ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อระดับความคิดเห็นของหัวหน้างานสวนป่า โดย การวิเคราะห์ทางสถิติไคสแควร์ (Chi-square)

ระยะเวลาในการปฏิบัติงานด้านการทำไม้ ไม่มีความสัมพันธ์ กับ ระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 (Chi-Square=1.049 , Sig=0.789)

ประสบการณ์ทำงานในฝ่ายทำไม้ของงานสวนป่า ไม่มีความสัมพันธ์ กับ ระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 (Chi-Square=5.935 , Sig=0.313)

ประสบการณ์ใช้เครื่องจักรกลในการทำไม้ ไม่มีความสัมพันธ์ กับ ระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 (Chi-Square=4.933 , Sig=0.085)

ระดับความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้ มีความสัมพันธ์ กับ ระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 (Chi-Square= 7.676 , Sig=0.022) ดังแสดงไว้ใน Table 2

Table 2 Chi-Square testing between logging machinery development knowledge levels and logging machinery power sources development opinion levels.

Logging machinery development knowledge levels	Logging machinery power sources development opinion levels		Total
	Low	High	
Low (5.00-9.67 points)	10	10	20
Moderate (9.68-14.35 points)	11	31	42
High (14.36-19.00 points)	2	17	19
Total	23	58	81

χ^2 =7.676 Sig. = 0.022

ระดับความคิดเห็นต่อปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้และ/หรือเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้ มีความสัมพันธ์ กับ ระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 (Chi-Square=21.467 , Sig=0.000) ดังแสดงไว้ใน Table 3

จากผลการศึกษา ระดับความคิดเห็นของหัวหน้างานสวนป่าต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้อยู่ในระดับ เห็นด้วยมาก สอดคล้องกับแนวนโยบาย แนวโน้มในอนาคต จากการสัมภาษณ์ผู้บริหาร ที่ต้องการลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลในการทำไม้พร้อมกับลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเครื่องจักรกลที่ใช้พลังงานจากไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติและโอกาสที่จะเป็นไปได้ตามความต้องการเหล่านี้ในอนาคต แต่ยังต้องการข้อมูลของเครื่องจักรกลที่ใช้พลังงานจากไฟฟ้าเพื่อการเปรียบเทียบในปัจจุบัน ทั้งทางด้านการใช้งาน ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน ราคา ตัวแทนจำหน่าย ระเบียบและข้อกฎหมายสำหรับการวางแผนพัฒนาช่วงเริ่มต้น

Table 3 Chi-Square testing between factors influencing the logging machinery purchased and used pinion levels and logging machinery power sources development opinion levels.

Factors influencing the logging machinery purchased and used opinion levels	Logging machinery power sources development opinion levels		Total
	Low	High	
Low (2.86 – 3.57)	10	3	13
Moderate (3.58 – 4.28)	9	20	29
High (4.29 – 5.00)	4	35	39
Total	23	58	81

χ^2 =21.467 Sig.=0.000

ในส่วนระยะเวลาในการปฏิบัติงานด้านการทำไม้ ประสบการณ์ทำงานในฝ่ายทำไม้ของงานสวนป่า ประสบการณ์ใช้เครื่องจักรกลในการทำไม้ เป็นปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ด้วยเพราะสถานการณ์ในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงาน โดยอ้างอิงกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน จึงทำให้หัวหน้างานสวนป่ารับทราบในเวลาเดียวกัน ทำให้ไม่สัมพันธ์กับปัจจัยเหล่านี้

ในส่วนปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ หัวหน้างานสวนป่ามีระดับความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้ ด้วยเพราะการปฏิบัติงานเกี่ยวข้องเชื่อมโยงกับเครื่องจักรกลในการทำไม้ หัวหน้างานสวนป่ามีความสามารถที่ประกอบกับความรู้เคยผ่านปัญหารวมถึงอุปสรรค และมีแนวทางในการพัฒนา ทำให้สามารถถ่ายทอดออกมาในรูปแบบของความคิดเห็นที่มีความสัมพันธ์ตามผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ และระดับความคิดเห็นต่อปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้และ/หรือเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้ สัมพันธ์ กับระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ สอดคล้องกับปัจจัยในการตัดสินใจเลือกซื้อจากการสัมภาษณ์ผู้บริหาร ซึ่งหัวหน้างานสวนป่าได้รับการถ่ายทอดมาตามลำดับและขั้นตอนการปฏิบัติงาน

สรุป

ระดับความคิดเห็นขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้อยู่ในระดับ เห็นด้วยมาก ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับระดับความคิดเห็นต่อการพัฒนาต้นกำเนิดพลังงานของเครื่องจักรกลในการทำไม้ ได้แก่ ระดับความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้ และระดับความคิดเห็นต่อปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้และ/หรือเลือกซื้อเครื่องจักรกลในการทำไม้

การพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้ องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้มีความพร้อมด้านความรู้ที่จะแสดงความคิดเห็นต่อการพัฒนาเครื่องจักรกลในการทำไม้ มุ่งหมายแทนที่การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในด้วยพลังงานจากไฟฟ้าในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สามารถใช้เป็นแนวทางการตัดสินใจที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุง เปลี่ยนแปลง ประดิษฐ์ คิดค้น ออกแบบ สร้าง รวมถึงผลิตเครื่องจักรกลไฟฟ้ารุ่นใหม่ให้มีความเหมาะสมกับความต้องการในด้านการทำไม้จากผู้ผลิต และเมื่อมีการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้าในอนาคต จะส่งผลดีต่อทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในท้ายที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ ในความกรุณาอย่างมหาศาลของคณะผู้บริหารและหัวหน้างานสวนป่าทั่วประเทศที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2559. **ก๊าซเรือนกระจกคืออะไร** (Online). http://www.environnet.in.th/archives/1126, 12 มีนาคม 2562.

จเร ขันตี. 2546. **ความคิดเห็นของผู้ประกอบการต่อกฎระเบียบด้านป่าไม้ที่เกี่ยวกับการนำไม้หรือของป่าเคลื่อนที่ และการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ ณ ด่านป่าไม้กรุงเทพ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จุไรรัตน์ พรมศิริ. 2507. **อุตสาหกรรมทำไม้ในจังหวัดชลบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชเยนทร์ ปิเลี่ยน. 2547. **ความคิดเห็นของข้าราชการกรมป่าไม้เกี่ยวกับปัญหาการบริหารงานภายหลังการปฏิรูประบบราชการ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชัยพงษ์ โชติวรรณ. 2541. **ความคิดเห็นของประชาชนต่อการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ตำรวจที่สถานีตำรวจภูธร อำเภอเมืองบุรีรัมย์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

นพมาศ ธีรเวคิน. 2542. **จิตวิทยาสังคมกับชีวิต.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พรเพ็ญ เพชรสุขศิริ. 2531. **การวัดทัศนคติ.** คณะสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2558. **นวัตกรรมการออกแบบเครื่องจักรกลป่าไม้** (Online). https://sites.google.com/a/ku.th/forest-machine-contest/, 11 มีนาคม 2562.

วิชาญ รุ่งอุทัย. 2533. **ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความคิดเห็น ในพฤติกรรมทางเพศของวัยรุ่น.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.

วิเชียร เกตุสิงห์. 2530. **หลักการสร้างและวิเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.** ไทยวัฒนาพานิช, กรุงเทพฯ.

สมศรี ชาญชญานนท์. 2544. **ความคิดเห็นของผู้บริหารกรมป่าไม้ ที่มีต่อนโยบายป่าไม้แห่งชาติ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เสรี พิพัฒชัยภูมิ. 2535. **เจาะความคิดยอดนักประดิษฐ์ผู้เปลี่ยนโฉมโลก.** บริษัท ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการข้อมูลข่าวสารของราชการ. 2559. **องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ (อ.อ.ป.)** **Forest Industry Organization** (Online). http://www.oic.go.th/ginfo/@dmin. asp?t=3&g=007&i=I%262622235, 12 สิงหาคม 2562

อำนวย คอวนิช. 2524. **บทความแนวคิดการป่าไม้และอุตสาหกรรมไม้.** ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

________. 2526. **เครื่องมือป่าไม้ชนบท.** สมาคมป่าไม้แห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

________. 2529. **การทำไม้ (Logging).** กองทุนจัดพิมพ์ตำราป่าไม้ คณะวนศาสตร์ หาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Krejcie, R. V. and D.W. Morgan. 1970. Determining sample size for research activities. **Educational and Psychological Measurement** 3(30): 607-610.

United Nations Development Programme. 2015. **Sustainable Development Goals** (Online). https://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals.html, March 12, 2019.

สถานภาพสัตว์ป่าในสภาพกรงเลี้ยงของสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าในประเทศไทย

Wildlife Status under Captive Condition at Wildlife Breeding Stations in Thailand

สุภาภรณ์ วิสารวุฒิ[1*] รองลาภ สุขมาสรวง[2] และ ประทีป ด้วงแค[2]

Supaporn Wisarawut[1*], Ronglarp Sukmasuang[2] and Prateep Duangkae[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสถานภาพของสัตว์ป่าในสภาพกรงเลี้ยงของสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าในประเทศไทย ทั้งหมด 26 สถานี (เดือนมกราคม 2559 – ธันวาคม 2561) เปรียบเทียบความแตกต่างของจำนวนชนิดพันธุ์และจำนวนตัวในแต่ละชนิด ตามประเภทของสัตว์ป่า ได้แก่ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม นก สัตว์เลื้อยคลาน และสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก และสถานภาพการอนุรักษ์คุ้มครอง พบว่า มีสัตว์ป่าในสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่า รวม 463 ชนิด จำนวน 329,928 380,136 และ 342,046 ตัว ตามลำดับ เฉลี่ยแล้วมีสัตว์ป่าในการดูแล 356,832 ตัว/ปี มีสัตว์ป่าที่ได้รับการคุ้มครองตามพระราชบัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ.2535 รวม 301 ชนิด แบ่งเป็น สัตว์ป่าสงวนจำนวน 6 ชนิดและสัตว์ป่าคุ้มครองจำนวน 295 ชนิด สถานภาพการอนุรักษ์ตาม IUCN (2019) จำนวน 416 ชนิด สถานภาพการอนุรักษ์ตามสำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จำนวน 322 ชนิด และสัตว์ป่าตามการคุ้มครองตามอนุสัญญา CITES จำนวน 206 ชนิด นำข้อมูลชนิดและจำนวนสัตว์ป่ามาวิเคราะห์โดยการแจกแจงในรูปแบบสถิติอย่างง่าย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (average) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แยกรายสถานี จำแนกเป็นรายเดือน และรายปี พบว่า จำนวนชนิด และจำนวนตัวของสัตว์ป่าในแต่ละสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ABSTRACT

This study aimed to study the wildlife status in captive condition of the 26 wildlife breeding stations in Thailand (January 2016 to December 2018). Compare the differences between number of species and number of individual species. The wildlife is according to the type of wildlife there are mammal, bird, reptile and amphibian. The conservation status and protection of the animal are also classified. The results indicated that there are a total of 463 wildlife species under the care of wildlife breeding stations, of which 329,928 380,136 and 342,046 individuals respectively, an average of 356,832 individuals/ year. When classified by conservation and protection status, there are protected wildlife under the Reserve Act and Wildlife protection 1992, a total of 301 species, divided into 6 species of reserved wildlife and 295 species of protected wildlife, 416 protected wildlife species designated by the IUCN (2019) and 322 species of wildlife protected by the Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning and 206 species of wildlife protected by CITES. Data are analyzed by station, monthly, yearly, it is found that the number of species and the number of wildlife in each wildlife breeding station were significantly different at 95% confidence.

Key words: wildlife breeding station, wildlife conservation status, *ex-situ* conservation

* Corresponding author; e-mail address: Supaporn.wis@gmail.com

[1] สาขาการบริหารทรัพยากรป่าไม้และสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Forest Resource and Environment Administration, Graduate School, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2] ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2] Department of Forest Biology, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าในกรงเลี้ยงของประเทศไทย มีการดำเนินการอย่างจริงจังมาตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2535 ภายหลังการปรับปรุงพระราชบัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2535 โดยการเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าในกรงเลี้ยงนั้น นอกจากมุ่งหวังในด้านการเพิ่มประชากรสัตว์ป่าแล้ว ยังมีประโยชน์ในการเก็บรักษาชนิดพันธุ์หายากและการปล่อยกลับคืนสู่ธรรมชาติ ดังนั้นสัตว์ป่าที่อยู่ในกรงเลี้ยงถือเป็นการเก็บรักษาประชากรในกรงเลี้ยงในระยะยาว จึงมีความสำคัญยิ่งที่ต้องทราบสถานภาพของสัตว์ป่าแต่ละกลุ่มเพื่อการบริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ

การอนุรักษ์สัตว์ป่านอกจากการอนุรักษ์ในถิ่นกำเนิดที่เป็นพื้นที่ธรรมชาติ (*In situ* Conservation) แล้ว การอนุรักษ์นอกถิ่นกำเนิด (*Ex – situ* Conservation) ในสถานีเพาะเลี้ยงหรือสวนสัตว์เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการอนุรักษ์พันธุกรรมของสัตว์ป่าเหล่านั้น (Condo *et al.*, 2011) การอนุรักษ์สัตว์ป่าในถิ่นกำเนิดบางครั้งไม่ประสบความสำเร็จ จำเป็นต้องมีการจัดตั้งศูนย์อนุรักษ์สัตว์ป่านอกถิ่นกำเนิด เพื่อการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์และจัดการสัตว์ป่านอกถิ่นกำเนิดเพื่อให้สัตว์ป่าที่ใกล้สูญพันธุ์มีโอกาสอยู่รอดต่อไป (Cooper *et al.*, 2009) ซึ่ง Taronga Conservation Society Australia (2017) พบว่า สัตว์ป่าหายากใกล้สูญพันธุ์ 10 ชนิด สามารถรอดจากการสูญพันธุ์ได้ด้วยการอนุรักษ์ในสวนสัตว์ แต่การเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าในกรงเลี้ยงหรือการเลี้ยงดูในสวนสัตว์ก็มิได้ประสบความสำเร็จเสมอไป Amanda (2017) พบว่า สัตว์ที่อยู่ใน South Lakes Safari Zoo ตายกว่า 500 ตัว ในเวลา 4 ปี เนื่องจากความแออัดของสัตว์ ขาดโภชนาการที่ดี และการปล่อยให้สัตว์ผสมพันธุ์กันโดยขาดการควบคุม การศึกษาสถานภาพของสัตว์ป่าในกรงเลี้ยงยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน การขาดข้อมูลที่ชัดเจนทำให้ทิศทางการในการจัดการในสภาพกรงเลี้ยงไม่ประสบความสำเร็จ

การศึกษาสถานภาพของสัตว์ป่าในสภาพกรงเลี้ยงของสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าในประเทศไทย ครั้งนี้ เป็นการศึกษาชนิดและจำนวนแต่ละชนิดของสัตว์ป่าที่อยู่ในกรงเลี้ยงของสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่า ที่กระจายอยู่ตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทยทั้งในอดีตและปัจจุบัน เพื่อใช้ในการวางแผนการดำเนินงานการอนุรักษ์สัตว์ป่านอกถิ่นกำเนิด การกำหนดแผนการฟื้นฟูสัตว์ป่าใกล้สูญพันธุ์ การวางแผนการปฏิบัติเพื่อการปล่อยสู่ธรรมชาติ รวมทั้งเตรียมการสนับสนุนการเพาะเลี้ยงเพื่อการใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจตามที่ทางราชการอนุญาตให้เพาะเลี้ยงได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลชนิดและจำนวนตัวของสัตว์ป่าในสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่า 26 สถานี จำแนกตามกลุ่มสัตว์ ได้แก่ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม นก สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก และสัตว์เลื้อยคลาน จำแนกตามสถานภาพการคุ้มครองตามพระราชบัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2535 สถานภาพทางการอนุรักษ์โดย The International Union for Conservation of Nature; IUCN (2019) สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2560)และอนุสัญญาว่าด้วยการค้าระหว่างประเทศซึ่งชนิดสัตว์ป่าและพืชป่าที่ใกล้สูญพันธุ์ (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora; Cites, 2019) ตลอดจนสัตว์ป่านอกคุ้มครองและสัตว์ป่าต่างประเทศและสัตว์ป่าที่ทางราชการอนุญาตให้ประชาชนเพาะเลี้ยงได้ในแต่ละแห่งและการเปลี่ยนแปลงในรอบปี

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลชนิดและจำนวนสัตว์ป่าในกรงเลี้ยงภายในสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่า ทั้งหมด 26 สถานี ในช่วงระยะเวลาย้อนหลัง 3 ปี ระหว่างเดือนมกราคม 2559-ธันวาคม 2561 โดยการแจกแจงในรูปแบบสถิติอย่างง่าย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (average) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ผลและวิจารณ์

จากการศึกษา พบว่า ปี พ.ศ. 2560 มีสัตว์ป่าในความดูแลมากที่สุด 380,136 ตัว จำแนกเป็นนกมากที่สุด 219 ชนิด จำนวน 249,555 ตัว สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 80 ชนิด จำนวน 87,758 ตัว สัตว์เลื้อยคลาน 50 ชนิด จำนวน 42,667 ตัว และสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกน้อยที่สุด 1 ชนิด จำนวน 156 ตัว โดยแบ่งเป็นรายปี (Table 1)

เมื่อพิจารณาจำนวนตัวสัตว์ป่า พบว่า สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าที่มีจำนวนตัวสัตว์ในความดูแลมากที่สุด ได้แก่ สถานีที่ 3 สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าเขาสน (2,742 ตัว/ปี) สถานที่ 15 สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าบางพระ (2,582 ตัว/ปี) และสถานีที่ 21 สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าภูเขียว (2,401 ตัว/ปี) ตามลำดับ โดยสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าภูเขียวมีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวสัตว์ป่ามากที่สุด (SD=606.4) รองลงมา คือ สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าบางพระ (SD = 576.1) และสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าเขาสน (SD=472.1) ตามลำดับ

หากพิจารณาถึงจำนวนชนิดของสัตว์ป่าที่อยู่ในความดูแล พบว่า สถานีที่ 14 สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่านกน้ำบางพระ มีชนิดสัตว์ป่ามากที่สุด 110 ชนิด (SD=45.0) รองลงมาคือ สถานีที่ 15 สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าบางพระ 90 ชนิด (SD=28.40) และสถานีที่ 3 สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าเขาสน 88 ชนิด (SD=13.34) (Figure 1 และ Figure 2)

จากข้อมูลจำนวนตัวสัตว์ป่าที่อยู่ในความดูแลเฉลี่ย 356,832 ตัว/ปี สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าที่มีสัตว์ป่าในความดูแลมากที่สุด 88 ชนิด จำนวน 2,742 ตัว/ปี เมื่อเทียบกับสวนสัตว์ San Diego Zoo ซึ่งเป็นสวนสัตว์ขนาดใหญ่ที่สุดในโลกซึ่งมีสัตว์อยู่เพียง 650 ชนิด จำนวน 3,700 ตัว หรือ Frankfurter Zoo ซึ่งมีสัตว์อยู่กว่า 450 ชนิด จำนวน 4,500 ตัว ปัจจุบันสวนสัตว์ต่างๆ กำลังมีการปรับเปลี่ยนทั้งชนิดและจำนวนสัตว์ให้มีความเหมาะสมมากขึ้นเพื่อให้เป็นไปตามหลักสวัสดิภาพสัตว์ (Zoosfacts, 2019) ทั้งนี้ พบว่าสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าที่มีการเปลี่ยนแปลงของชนิดและจำนวนสัตว์อยู่เสมอจะเป็นสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าที่มีภารกิจในการรับสัตว์ป่าของกลางและสัตว์ป่าจากกรณีการช่วยเหลือและแก้ไขปัญหา

สถานภาพทางการอนุรักษ์ เมื่อพิจารณาความคุ้มครองตามพระราช บัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2535 พบว่า ชนิดสัตว์ที่สำคัญหลายชนิด จำแนกเป็นสัตว์ป่าสงวน จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ นกกระเรียน เลียงผา กวางผา เก้งหม้อ ละอง-ละมั่ง และสมเสร็จ สัตว์ป่าคุ้มครอง 295 ชนิด สัตว์ป่าที่ได้รับการจัดสถานภาพทางการอนุรักษ์ที่กำหนดโดย IUCN (2019) จำนวน 416 ชนิด สัตว์ป่าที่ได้รับการอนุรักษ์ตามสำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จำนวน 322 ชนิด และสัตว์ป่าตามการคุ้มครองของ CITES จำนวน 206 ชนิด จำแนกเป็นสัตว์ป่าที่ทางราชการอนุญาตให้เพาะพันธุ์ จำนวน 51 ชนิด จากสถานภาพการอนุรักษ์สามารถเป็นแนวทางในการวางแผนการเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าในแต่ละสถานีเพาะเลี้ยงว่าควรมุ่งเน้นการเพาะพันธุ์สัตว์ป่าสงวนและสัตว์ป่าคุ้มครองมีอยู่ในสถานภาพวิกฤตเพื่อการฟื้นฟูความหลากหลายในธรรมชาติ หรือในกรณีของสัตว์ป่าที่ทางราชการอนุญาตให้เพาะพันธุ์ได้ควรเน้นให้มีการเพาะพันธุ์ให้ได้ผลผลิตเพียงพอต่อความต้องการของประชาชน เพราะนอกจากจะเป็นการส่งเสริมอาชีพ การสร้างรายได้แล้วยังถือเป็นการส่งเสริมการอนุรักษ์สัตว์ป่าในทางอ้อมด้วย (Table 2)

Table 1 Species and number of wildlife in captive condition of wildlife breeding center 26 stations in Thailand.

Year	Month	Mammal		Bird		Reptile		Amphibian		Sum		Average		SD	
		Sp.	Number	Sp.	Number	Sp.	Number	Sp.	Number	Sp.	Number	Sp.	Number	Sp.	Number
2559	Jan	69	4,449	198	15,868	47	5,939	2	54	316	26,310	79	6,578	4.2	3.3
	Feb	69	4,459	203	16,459	48	6,266	2	54	322	27,238	81	6,810	4.3	3.5
	Mar	69	4,597	205	16,550	47	6,738	1	20	322	27,905	81	6,976	4.4	3.5
	Apr	67	4,599	209	17,276	46	6,036	1	20	323	27,931	81	6,983	4.5	3.6
	May	67	4,714	211	18,233	47	6,913	1	20	326	29,880	82	7,470	4.5	3.9
	Jun	68	4,902	207	18,200	44	6,395	1	20	320	29,517	80	7,379	4.5	3.9
	Jul	68	4,922	208	17,408	44	6,069	1	20	321	28,419	80	7,105	4.5	3.7
	Aug	67	4,841	209	16,492	50	5,810	1	18	327	27,161	82	6,790	4.5	3.5
	Sep	68	4,994	208	16,107	50	5,950	1	18	327	27,069	82	6,767	4.4	3.4
	Oct	69	4,941	205	15,595	55	5,982	1	18	330	26,536	83	6,634	4.3	3.3
	Nov	69	5,044	199	14,981	53	5,708	1	18	322	25,751	81	6,438	4.2	3.1
	Dec	73	5,377	204	15,208	56	5,608	1	18	334	26,211	84	6,553	4.3	3.2
2560	Jan	64	4,905	190	20,753	31	2,452	1	8	286	28,118	72	7,030	4.2	4.7
	Feb	62	5,902	186	21,615	25	3,135	1	8	274	30,660	69	7,665	4.1	4.8
	Mar	63	4,726	194	21,395	24	1,674	1	14	282	27,809	71	6,952	4.3	5.0
	Apr	72	7,273	203	23,345	41	7,601	1	14	317	38,233	79	9,558	4.8	4.9
	May	68	6,669	191	24,054	24	3,290	1	14	284	34,027	71	8,507	4.2	5.4
	Jun	59	8,588	130	23,883	27	4,233	1	14	217	36,718	54	9,180	2.8	5.2

Table 1 (Continued)

Year	Month	Mammal		Bird		Reptile		Amphibian		Sum		Average		SD	
		Sp.	Number	Sp.	Number	Sp.	Number	Sp.	Number	Sp.	Number	Sp.	Number	Sp.	Number
	Jul	64	8,226	145	24,002	24	2,945	1	14	234	35,187	59	8,797	3.2	5.5
	Aug	60	8,198	129	22,213	23	3,793	1	14	213	34,218	53	8,555	2.8	4.9
	Sep	61	7,714	146	20,676	23	2,943	1	14	231	31,347	58	7,837	3.2	4.6
	Oct	59	9,114	131	22,755	25	4,323	1	14	216	36,206	54	9,052	2.8	4.9
	Nov	61	7,796	147	21,433	25	2,753	1	14	234	31,996	59	7,999	3.2	4.8
	Dec	59	8,986	130	21,765	25	3,437	1	14	215	34,202	54	8,551	2.8	4.8
2561	Jan	78	5,206	214	15,184	62	5,243	1	1	355	25,634	89	6,409	45	3.2
	Feb	80	5,629	220	15,812	57	5,186	1	1	358	26,628	90	6,657	4.7	3.3
	Mar	78	6,468	225	18,412	55	4,583	1	1	359	29,464	90	7,366	4.8	3.9
	Apr	79	5,469	219	18,249	55	6,441	1	1	354	30,160	89	7,540	4.6	3.9
	May	80	5,429	225	18,458	56	6,859	1	1	362	30,747	91	7,687	4.8	3.9
	Jun	80	5,448	231	19,134	56	6,679	1	1	368	31,262	92	7,816	4.9	4.0
	Jul	80	5,501	228	18,862	58	4,967	1	1	367	29,331	92	7,333	4.8	4.3
	Aug	79	5,657	232	17,305	54	7,082	1	1	366	30,045	92	7,511	5.0	3.6
	Sep	80	5,577	229	17,175	59	4,780	1	1	369	27,533	92	6,883	4.9	3.6
	Oct	80	5,232	233	16,866	58	5,078	1	1	372	27,177	93	6,794	4.9	3.6
	Nov	79	5,265	233	16,847	57	4,807	1	1	370	26,920	93	6,730	4.9	3.6
	Dec	77	5,337	235	15,909	57	5,698	1	1	370	26,945	93	6,736	5.0	3.2

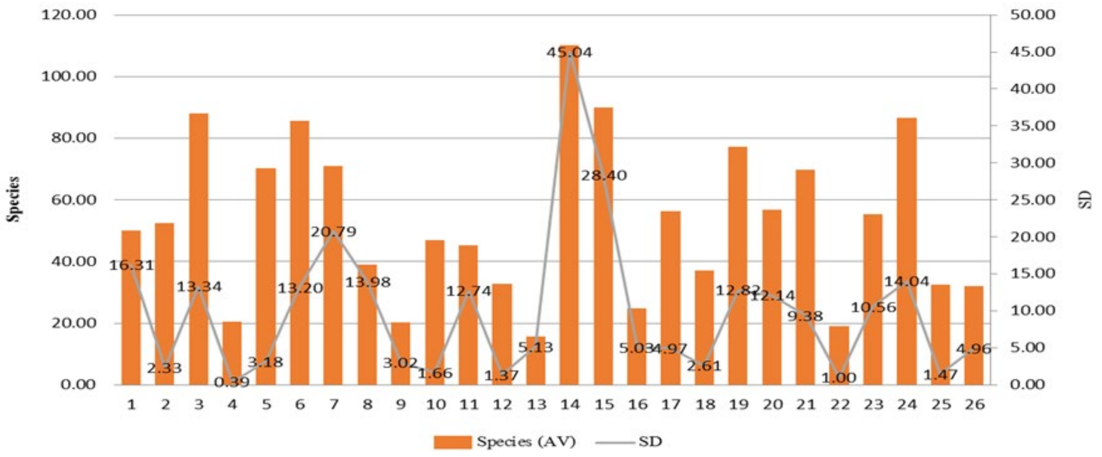


Figure 1 Number of wildlife species in captive condition of 26 wildlife breeding stations in Thailand.

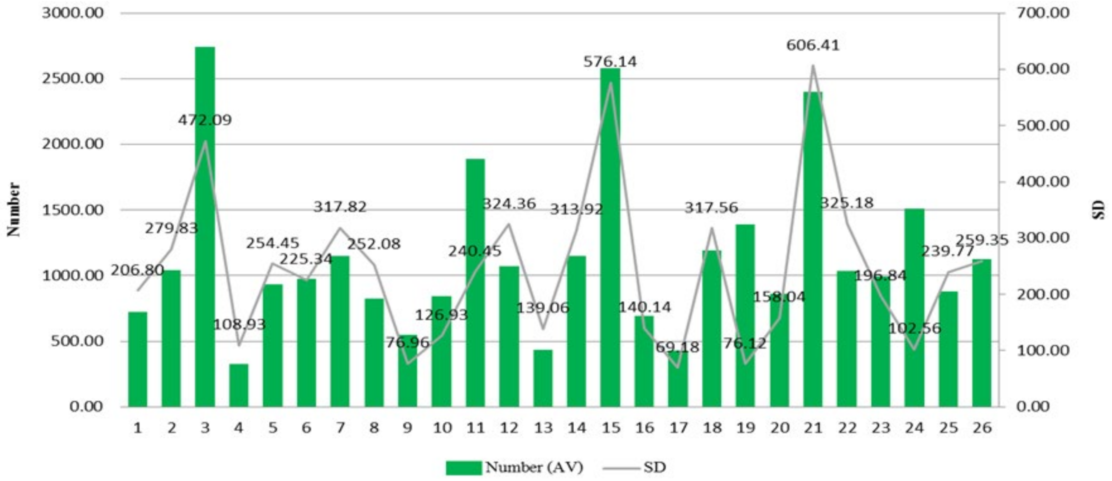


Figure 2 Number of wildlife individual in captive condition of 26 wildlife breeding stations in Thailand.

1 is Wildlife Rescue Center 1	2 is Khao kho Wildlife Breeding Station
3 is Khaozon Wildlife Breeding Station	4 is Mae Chan Wildlife Breeding Station
5 is Maelao Wildlife Breeding Station	6 is Khok Mai Ruea Wildlife Breeding Station
7 is Ton Nga Chang Wildlife Breeding Station	8 is Krabok Koo Wildlife Breeding Station
9 is Khon Kaen Wildlife Breeding Station	10 is Chulabhorn Wildlife Breeding Station
11 is Chong klam bon Wildlife Breeding Station	12 is Doi Tung Wildlife Breeding Station
13 is Thawat Buri Wildlife Breeding Station	14 is Bangphra Water Bird Breeding Station
15 is Bangphra Wildlife Breeding Station	16 is Banglamung Wildlife Breeding Station
17 is Khao Pratapchang Wildlife Breeding Station	18 is Pangtong Wildlife Breeding Station
19 is Phang-nga Wildlife Breeding Station	20 is Phatthalung Wildlife Breeding Station
21 is Phu Khiao Wildlife Breeding Station	22 is Khaosoidao Wildlife Breeding Station
23 is Huai Kha Khaeng Wildlife Breeding Station	24 is Huaisai Wildlife Breeding Station
25 is Huai Yang Pan Wildlife Breeding Station	26 is Omkoi Wildlife Breeding Station

Table 2 Conservation Status of Wildlife in captive condition of 26 wildlife breeding stations in Thailand.

Group	Thai Law	Thailand Red Data	CITES	IUCN
Aves	WP (209), WR (1), WB (37),Exo (14)	EW (2), CR (10), EN (11), VU (11), NT (34), LC (149)	CITES I (16), CITES II (78), CITES III (2),	CR (4),EN (9) LC (205), NT (27) , VU (16)
Mammal	WP (50), WR (5) WB (8),Exo (12)	CR (6) , EN (19), VU (16), NT (8), LC (16) , DD (1)	CITES I (27), CITES II (21, CITES III (9),	CR (4), EN (18) LC (40), NT (8) , VU (15), DD (2)
Reptile	WP (29),WB (6) Exo (15)	CR (6), EN (2), VU (1) ,NT (10), LC (19)	CITES I (12), CITES I ,II (2), CITES II (39)	CR (7), EN (8), LC (35), NT (2) , VU (12), DD (1)
Amphibian	WP (1),Exo (2)	VU (1)		LC (2), VU (1)

Thai Law is Status of Reserve Act and Wildlife protection 1992

WP is Wildlife Protected WR is Wildlife Reservation

WB is Wildlife for Breeding Exo is Exotic species

Thailand Red Data is Wildlife Status of Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning

EW is Extinct in the wild CR is Critically Endangered EN is Extinct

VU is Vulnerable NT is Near Threatened LC is Least Concerned

DD is Data Deficient

CITES is Wildlife Status of Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora

CITES I are species that are threatened with extinction and are or may be affected by trade

CITES II are species that are not necessarily threatened with extinction, but may become so unless trade in specimens of such species is subject to strict regulation in order to avoid utilization incompatible with the survival of the species in the wild.

CITES are species that are listed after one member country has asked other CITES Parties for assistance in controlling trade in a species

IUCN is Wildlife Status of The International Union for Conservation of Nature

CR is Critically endangered species EN is Endangered species VU is Vulnerable species NT is Near Threatened LC is Least Concern DD is Data Deficient

สรุป

การศึกษาสถานภาพของสัตว์ป่าในสภาพกรงเลี้ยงของสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่าในประเทศไทย พบว่า มีสัตว์ที่อยู่ในความดูแลของสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่า รวม 463 ชนิด จำนวน 1,070,495 ตัว โดยคิดเป็นจำนวนเฉลี่ย 356,832 ตัว/ปี เป็นสัตว์ป่าคุ้มครอง 295 ชนิด และเป็นสัตว์ป่าสงวน จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ นกกระเรียน เลียงผา กวางผา เก้งหม้อ ละอง-ละมั่ง และสมเสร็จ สถานภาพทางการอนุรักษ์ที่กำหนดโดย IUCN (2019) จำนวน 416 ชนิด สัตว์ป่าที่ได้รับการอนุรักษ์ตามสำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จำนวน 322 ชนิด สัตว์ป่าตามอนุสัญญา CITES จำนวน 206 ชนิด สัตว์ป่าที่ทางราชการอนุญาตให้เพาะพันธุ์ จำนวน 51 ชนิด และสัตว์ป่าต่างประเทศ 43 ชนิด เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์แยกรายสถานี รายเดือน รายปี พบว่า จำนวนชนิดพันธุ์และจำนวนตัวสัตว์ป่าในแต่ละสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรศ.ดร.รองลาภ สุขมาสรวง รศ.ดร.ประทีป ด้วงแค และกลุ่มงานเพาะเลี้ยงสัตว์ป่า สำนักอนุรักษ์สัตว์ป่า กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ที่ให้คำปรึกษาและอนุเคราะห์ข้อมูลในการทำการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กองประสานการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2560. **สรุปชนิดพันธุ์ที่ถูกคุกคามของประเทศไทย: สัตว์มีกระดูกสันหลัง**. บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.

CITES Secretariat International Environment House. 2019. **Checklist of CITES Species**, from http://checklist.cites.org/#/en, September 10, 2019

Condo, D.A., N. Flesness, F. Colchero, O.R. Jones and A. Scheuerlin. 2011. AnEmerging Role of Zoos to Conserve Biodiversity. **SCIENCE**. 331: 1390-1391

Cooper, A.M., L.M. Miller and A.R. Kapuscinski. 2009. Conservation of population structure and genetic diversity under captive breeding of remnant coaster brook trout (*Salvelinus fontinalis*) populations. **Conserv Genet**: Doi 10.1007/s10592-009-9841-0.

Amanda D. 2017. **ZOO OF DOOM South Lakes Safari Zoo where almost 500 animals died in just four years and tiger keeper was mauled to death will stay open.** from https://www.thesun.co.uk/news/3521985/south-lakes-safari-zoo-will-stay-open, October 22, 2019.

International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. 2019. **The iucn red list of threatened species**. from https://www.iucnredlist.org, September 10, 2019.

Taronga Conservation Society Australia. 2017. **10 Endangered Species Saved from Extinction by Zoos.** from http://medium.com/taronga-conservation-society-australia/10-endangered-species-saved-from-extinction-by-zoos-682c454d0125, October 22, 2019.

Zoosfacts. 2018. **How Many Animals Live in Zoos**. from http://zoos.media/zoo-facts/how-many-animals-live-in-zoos/?lang=en, October 24, 2019.

ความหนาแน่น และการเคลื่อนที่ตามฤดูกาลของกิ้งก่าเขาเล็ก (*Acanthosaura lepidogaster*) ในป่าดิบเขาบริเวณพื้นที่สงวนชีวมณฑลแม่สา-คอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

Seasonal Density and Movement of Cuvier's Spiny Lizard (*Acanthosaura lepidogaster*) in Hill Evergreen Forest, Mae Sa–Kog Ma Biosphere Reserve, Chiang Mai Province

บงกชรัตน์ ภัทรมนัส[1] ปานวริศร์ ปานศรี[1] ศุภลักษณ์ ศิริ[1] ยุวดี พลพิทักษ์[1] อภิษฎา เรืองเกตุ[1]
ยอดชาย ช่วยเงิน[2] และ ประทีป ด้วงแค[1*]

Bongkochrat Pattaramanas[1], Paanwaris Paansri[1], Supalak Siri[1], Yuwadee Ponpituk[1], Apisada Rueangket[1],
Yodchaiy Chuaynkern[2] and Prateep Duengkae[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษาความหนาแน่น และการเคลื่อนที่ตามฤดูกาลของกิ้งก่าเขาเล็ก (*Acanthosaura lepidogaster*) ในป่าดิบเขาบริเวณพื้นที่สงวนชีวมณฑลแม่สา-คอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ ใช้วิธีการสำรวจภาคสนาม 2 วิธี ประกอบด้วยการวางหลุมดักสัตว์ (pitfall) และการเดินสำรวจโดยตรง (direct observation) ซึ่งแบ่งออกเป็นการเดินสำรวจตอนกลางวัน และตอนกลางคืน ผลการศึกษาการปรากฏของกิ้งก่าเขาเล็กพบว่าเพศผู้พบได้มากกว่าเพศเมียในฤดูแล้ง และการปรากฏของเพศเมียมากกว่าเพศผู้ในฤดูฝน ในส่วนของประชากรกิ้งก่าเขาเล็กตามฤดูกาล พบความหนาแน่นของเพศเมียมากกว่าเพศผู้ ทั้ง 5 session นอกจากนี้การเคลื่อนที่เฉลี่ยของกิ้งก่าเขาเล็ก ในแต่ละ session มีการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน โดยใน session ที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 มีระยะทางการเคลื่อนที่เฉลี่ยเท่ากับ 50.71±5.73, 22.24±5.10, 41.93±4.72, 51.17±8.50 และ 30.05±3.42 เมตร ตามลำดับ การกระจายของประชากรกิ้งก่าเขาเล็กในพื้นที่สงวนชีวมณฑลแม่สา-คอกม้า ทั้ง 5 session มีการกระจายแบบกลุ่ม (clumped) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปัจจัยความต้องการจำเพาะในระบบนิเวศของกิ้งก่าเขาเล็ก

ABSTRACT

Seasonal Density and Movement of Cuvier's Spiny Lizard (*Acanthosaura lepidogaster*) in hill evergreen forest, Mae Sa–Kog Ma Biosphere Reserve, Chiang Mai Province. Two field surveys were conducted, including pitfall and direct observation, which were divided into daytime and daylight surveys. The results of the study showed that males Cuvier's Spiny Lizard were more common than females during the dry season. And found more females than males in the rainy season. Seasonal changes in the Cuvier's Spiny Lizard have more female densities than males in all 5 sessions. The average movement of Cuvier's Spiny Lizard were different among session. In session 1, 2, 3, 4 and 5, the average movement distance is 50.71±5.73, 22.24±5.10, 41.93±4.72, 51.17±8.50 and 30.05±3.42 meters respectively. The distribution of Cuvier's Spiny Lizard in all 5 sessions is clumped. According to the specific needs in the ecosystem of Cuvier's Spiny Lizard.

Key words: Cuvier's Spiny Lizard, Density, Movement, Seasonal

* Corresponding Author; email address: prateep.du@ku.ac.th, yodchaiy@kku.ac.th

[1] ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Forest Biology, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

[2]Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

คำนำ

กิ้งก่าเป็นสัตว์เลื้อยคลานชนิดหนึ่งที่มีการวิวัฒนาการมาจากสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในกลุ่ม Labyrinthodont (Carroll, 1997) มีการพัฒนาโครงสร้างต่าง ๆ ภายในร่างกายเพื่อปรับให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมบนบก ทำให้สามารถขึ้นมาอาศัยอยู่บนบกได้อย่างสมบูรณ์ โดยที่ไม่ต้องอาศัยแหล่งน้ำในการดำรงชีวิต (ปิยวรรณ และคณะ, 2560) และยังเป็นกลุ่มสัตว์ที่มีความสามารถในการแพร่กระจายพันธุ์ไปได้ทั่วโลก ยกเว้นบริเวณขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ เนื่องจากปัจจัยแวดล้อมในเรื่องของอุณหภูมิที่มีความหนาวเย็น จนอุณหภูมิติดลบส่งผลทำให้สัตว์เลือดเย็นจำพวกสัตว์เลื้อยคลานที่ต้องควบคุมอุณหภูมิร่างกายให้เท่ากับสิ่งแวดล้อมก่อนออกไปทำกิจกรรมในแต่ละวันไม่สามารถอาศัยอยู่ได้ (กิตติพงศ์ และวุฒิ, 2560)

กิ้งก่าเขาเล็ก (*Acanthosaura lepidogaster*) จัดเป็นสัตว์ป่าคุ้มครอง ตามพระราชบัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2535 เป็นกิ้งก่าที่มีการกระจายพบได้ในพื้นที่ป่า โดยเฉพาะในประเภทป่าหรือสังคมพืชที่มีความชื้นสูง และมีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 700-1,400 เมตร (Das, 2010) ซึ่งพื้นที่สงวนชีวมณฑลแม่สา-คอกม้า ที่ทำการศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของอุทยานแห่งชาติดอยสุเทพ-ปุย และสามารถพบกิ้งก่าเขาเล็กได้ ถึงแม้ว่ากิ้งก่าเขาเล็กจะมีการกระจายในหลายพื้นที่ของประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยหรือผลการศึกษาเกี่ยวกับประชากร และการเคลื่อนที่ของกิ้งก่าเขาเล็ก ซึ่งอาจสัมพันธ์กับปัจจัยแวดล้อมในบริเวณถิ่นที่อยู่อาศัย ดังนั้นจึงดำเนินการศึกษากิ้งก่าเขาเล็กโดยใช้วิธีการวางหลุมดักสัตว์เลื้อยคลาน (pitfall) (ยุวดี, 2557) และวิธีการเดินสำรวจโดยตรง (direct observation) (บุษบง และคณะ, 2555) ในแปลงศึกษาสังคมพืชถาวรขนาด 16 เฮกตาร์ นอกจากนี้ได้นำเทคนิคการทำเครื่องหมายบนตัวกิ้งก่าโดยวิธีการจับซ้ำ-ปล่อย (capture-recapture) (White *et al*., 1982) โดยการใช้ไมโครชิป ร่วมกับวิธีการสักสี (colored plastic particles) (Northwest Marine Technology, 2017) ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถช่วยในการจำแนกกิ้งก่าเขาเล็กรายตัวได้ และทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ Spatial capture – recapture (SCR) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ข้อมูลประชากรเชิงพื้นที่ โดยใช้ข้อมูลจากการจับซ้ำ ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาความหนาแน่น และการเคลื่อนที่ตามฤดูกาลของกิ้งก่าเขาเล็กในบริเวณพื้นที่สงวนชีวมณฑลแม่สา-คอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่สามารถพบกิ้งก่าเขาเล็กอยู่อย่างชุกชุม ผลจากการศึกษาในครั้งนี้จะทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่น และการเคลื่อนที่ของกิ้งก่าในแต่ละฤดูกาล และยังเป็นข้อมูลสำหรับพื้นที่ที่สามารถนำไปสู่การประกอบการตัดสินใจเกี่ยวกับการจัดการพื้นที่อนุรักษ์ เพื่อให้สามารถรักษาถิ่นอาศัยและประชากรกิ้งก่าเขาเล็กได้อย่างยั่งยืนต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วิธีการสำรวจและเก็บข้อมูล

ศึกษาความหนาแน่น และการเคลื่อนที่ตามฤดูกาลของกิ้งก่าเขาเล็ก โดยเก็บข้อมูลภาคสนาม ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2560 ถึง กันยายน พ.ศ. 2562 เป็นเวลา 20 เดือน สำรวจเดือนละครั้ง ครั้งละ 3 วัน ในพื้นที่ป่าดิบเขาบริเวณพื้นที่สงวนชีวมณฑลแม่สา-คอกม้า โดยใช้แปลงตัวอย่างสังคมพืชถาวรที่มีการวางหลุมดักสัตว์ในแปลง เมื่อปีพ.ศ. 2557 (ยุวดี, 2557) มีขนาด 16 เฮกตาร์ หรือขนาด 400x400 เมตร ในพื้นที่ศึกษามีหลุมดักสัตว์ทุกๆ 50 เมตร ทั้งหมด 7 เส้นทาง เส้นทางละ 7 หลุม จำนวนทั้งหมด 49 หลุม

สำรวจกิ้งก่าเขาเล็ก 2 วิธี ดังนี้ 1. สำรวจโดยใช้หลุมดักสัตว์เลื้อยคลาน (Pitfall) โดยเปิดหลุมดักสัตว์ทิ้งไว้หนึ่งคืน จากนั้นกลับมาเช็คที่หลุมดักสัตว์ในวันถัดไปในช่วงเวลา 8.00-10.00 น. 2. เดินสำรวจโดยตรง (Direct observation) ในพื้นที่ศึกษา โดยแบ่งออกเป็นการเดินสำรวจตอนกลางวันและตอนกลางคืน การเดินสำรวจตอนกลางวัน เริ่มสำรวจพร้อมกับการเช็คหลุมดักสัตว์ ส่วนการเดินสำรวจตอนกลางคืนเริ่มสำรวจเวลา 19.00-22.00 น. บริเวณทางเท้า ป่าดงกล้วย ริมลำห้วย และฝายวัดน้ำ (weir) เมื่อพบกิ้งก่าเขาเล็ก จึงจับใส่ถุงพลาสติก บันทึกพิกัด โดยใช้ (GPSmap 60 CSx) เวลา และสถานที่พบ

2. วิธีการจำแนกเพศและวัดขนาด

จำแนกเพศกิ้งก่าเขาเล็กจากลักษณะภายนอก โดยการดูสีผิว ซึ่งกิ้งก่าเขาเล็กเพศผู้จะมีลำตัวสีเขียวสด หัวสีดำ และปากสีส้ม ส่วนกิ้งก่าเขาเล็กเพศเมียมีสีผิวเข้มกว่าเพศผู้ เช่น สีน้ำตาล สีน้ำตาลแดง หรือสีส้มเป็นสีเดียวกันทั้งตัว การแยกเพศจากลักษณะภายในสามารถจำแนกได้โดยกิ้งก่าเขาเล็กเพศผู้มีอวัยวะเพศผู้ (hemipenis) อยู่ในรูทวารร่วม (cloaca) จากนั้นวัดลักษณะทางสัณฐานของกิ้งก่าเขาเล็กโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (vernier caliper) โดยวัดขนาดความยาวลำตัวของกิ้งก่าตั้งแต่ปลายจมูกถึงรูทวาร (Snout-Vent length: SVL) เพื่อจำแนกตัวเต็มวัย (adult) (SVL>65 mm) กับตัวไม่เต็มวัย (juvenile และ subadult) (SVL<65 mm) และชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลเพื่อติดตามการเจริญเติบโต

3. วิธีการทำเครื่องหมาย-ปล่อย-จับซ้ำ (Mark-Capture-recapture) ในกิ้งก่าเขาเล็ก

ทำเครื่องหมาย-ปล่อย-จับซ้ำ (Mark- Capture-recapture) เพื่อระบุขนาดประชากร และหลีกเลี่ยงการจับซ้ำ สำหรับกิ้งก่าเขาเล็กตัวเต็มวัย (SVL>65 mm.) ใช้วิธีการฝังไมโครชิปขนาด 2x8 มิลลิเมตร ที่บริเวณใต้ท้องด้านหน้าขาหลังข้างขวา โดยไมโครชิปแต่ละอันมีเลขรหัสที่แตกต่างกัน และจดบันทึกลงในแบบฟอร์มบันทึกข้อมูล ส่วนกิ้งก่าเขาเล็กตัวไม่เต็มวัย (SVL≤65 mm.) ทำสัญลักษณ์ด้วยวิธีการสักสี (Northwest Marine Technology, 2017) โดยทำการผสมน้ำยาสักสี Visible implant elastomer tag (VIE TAGs) ในเข็มฉีดยา ขนาด 0.03 มิลลิลิตร หัวเข็มยาว 12 มิลลิเมตร และฉีดสีบริเวณต้นขาใต้ท้องของกิ้งก่าทั้ง 4 ข้าง เป็นเส้นตรงยาวประมาณ 0.4 เซนติเมตร โดยใช้รหัสสีที่แตกต่างกันในกิ้งก่าเขาเล็กแต่ละตัว สามารถเช็ครหัสสีได้โดยใช้ไฟฉายยูวีฉายไปที่บริเวณที่สักสีเพื่ออ่านรหัส และทำการจดบันทึกลงในแบบฟอร์ม

4. วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ Spatial capture-recapture

จัดเตรียมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลประชากรเชิงพื้นที่ด้วยวิธี Spatial capture-recapture โดยใช้แพคเกจ oSCR ในโปรแกรม R (Sutherland *et al.*, 2019) โดยข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. ไฟล์ข้อมูลการปรับใช้พิกัดกับดัก (Trap Deployment File: TDF) ประกอบด้วย จำนวนของหลุมดักและพิกัดของหลุมดักสัตว์ โดยข้อมูลพิกัดหลุมดักสัตว์ได้ทำการขยายขอบเขตจากจุดพิกัดเดิม เป็นรัศมีออกไป 25 เมตร ในโปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อนำมาคำนวณหาโอกาสการพบกิ้งก่าในหลุมกับดักสัตว์

2. ไฟล์ข้อมูลจำนวนประชากรกิ้งก่าเขาเล็กที่พบ (Encounter data: EDF) โดยแบ่งข้อมูลเป็น 3 ลักษณะ คือ จำนวนประชากรรายฤดูกาลในแต่ละปี (session), จำนวนประชากรรายเดือนในแต่ละฤดูกาล (occasion), รหัสที่ระบุตัวประชากร, เพศ และพิกัดประชากรที่พบซึ่งพิกัดต้องตรงกับพิกัดของกับดักสัตว์ (Table 1)

ขั้นตอนแรกต้องนำเข้าข้อมูลของพิกัดหลุมกับดักทั้งหมด 49 หลุม ลงในโปรแกรม ArcGis เพื่อทำการจัดวางพิกัดใหม่ ไว้สำหรับการวิเคราะห์คำนวณหาความเป็นไปได้ของกิ้งก่าที่เจอในแต่ละตัวว่ามีโอกาสที่จะตกลงไปในหลุมกับดักสัตว์หรือไม่ โดยใช้โปรแกรมสร้างพิกัดของหลุมกับดักสัตว์ แล้วทำการขยายขอบเขตของหลุมกับดักสัตว์ให้ออกไปจากจุดศูนย์กลาง โดยมีรัศมี 25 เมตร ให้ครอบคลุมพื้นที่ระหว่างหลุมกัดดักสัตว์และเพิ่มโอกาสในการพบเจอกิ้งก่าที่อยู่ห่างออกไปจากหลุมกับดักสัตว์แต่ยังอยู่ในรัศมี 25 เมตร เพื่อให้มีโอกาสและความเป็นไปได้ที่จะตกลงไปในหลุมกับดักสัตว์ แล้วใช้พิกัดหลุมกับดักสัตว์ดังกล่าวใส่ไว้ในไฟล์ของ TDF

Table 1 Data that is divided into 5 session according to the season which is collected in each month.

Session	Year	Season	Month	Trap night
1	2017	Rainy	July, August, September, October	360
2	2018	Dry	January, April	180
3	2018	Rainy	July, August, September, October	360
4	2019	Dry	December, January, February, March, April	450
5	2019	Rainy	May, June, July, August, September	450

ขั้นตอนที่สองนำข้อมูลประชากรพิกัดของกิ้งก่าแต่ละตัวจุดลงไปทับซ้อนกับพิกัดของหลุมกับดักที่เตรียมไว้ จากนั้นทำการอนุมานพิกัดของกิ้งก่าแต่ละตัวให้เป็นพิกัดเดียวกันกับหลุมกับดักทั้งหมด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ในบริเวณพื้นที่ศึกษาว่าสามารถพบจำนวนประชากรของกิ้งก่าเขาเล็กได้กี่ตัว และนำพิกัดของกิ้งก่าที่ได้ไปใส่ในไฟล์ข้อมูล EDF

ขั้นตอนที่สามทำการเตรียม และจัดเรียงข้อมูลเป็นไฟล์ของ TDF และ EDF ใน Excel ที่บันทึกในรูปแบบไฟล์ .csv เสร็จเรียบร้อยแล้ว นำข้อมูลทั้งหมดเข้าไปวิเคราะห์ในโปรแกรม R

ผลและวิจารณ์

ความหนาแน่นของกิ้งก่าเขาเล็ก

การศึกษาประชากรของกิ้งก่าเขาเล็กตามฤดูกาลในพื้นที่ศึกษา ซึ่งแบ่งออกเป็นทั้งหมด 5 session ตาม (Table 1) ผลการศึกษาพบว่า session ที่ 1 ฤดูฝน ปี 2017 พบกิ้งก่าเขาเล็กจำนวน 151 ตัว (เพศผู้ 58 ตัว, เพศเมีย 93 ตัว) โอกาสในการพบกิ้งก่าเพศผู้และเพศเมียเท่ากับ 0.038 และ 0.62 ตามลำดับ ใน session ที่ 2 ฤดูแล้ง ปี 2018 พบกิ้งก่าเขาเล็ก 35 ตัว (เพศผู้ 22 ตัว, เพศเมีย 13 ตัว) โอกาสในการพบเพศผู้ และเพศเมียเท่ากับ 0.63 และ 0.37 ตามลำดับ ใน session ที่ 3 ฤดูฝน ปี 2018 พบกิ้งก่าเขาเล็กทั้งหมด 163 ตัว (เพศผู้ 93 ตัว, เพศเมีย 80 ตัว) โอกาสในการพบเพศผู้ และเพศเมียคิดเป็น 0.51 และ 0.49 ตามลำดับ session ที่ 4 ฤดูแล้ง ปี 2019 พบจำนวน 36 ตัว (เพศผู้ 25 ตัว, เพศเมีย 11 ตัว) โอกาสในการพบเพศผู้และเพศเมียคิดเป็น 0.69 และ 0.31 ตามลำดับ และ session ที่ 5 ฤดูฝน ปี 2019 พบกิ้งก่าทั้งหมด 129 ตัว (เพศผู้ 53 ตัว, เพศเมีย 76 ตัว) โอกาสในการพบเพศผู้ และเพศเมียเท่ากับ 0.41 และ 0.59 ตามลำดับ จากผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบว่าโอกาสในการพบตัวประชากรของกิ้งก่าเขาเล็กเพศผู้ และเพศเมียแตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล โดยฤดูฝนมีโอกาสในการพบกิ้งก่าเขาเล็กเพศเมียมากกว่าเพศผู้ ยกเว้น session ที่ 3 ฤดูฝน ปี 2018 ที่มีโอกาสในการพบเพศผู้ได้มากกว่าแต่ค่าที่ได้แตกต่างกันไม่มากนัก ส่วนในช่วงฤดูแล้งมีโอกาสพบประชากรกิ้งก่าเขาเล็กเพศผู้มากกว่าเพศเมีย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pal *et al*. (2010) ในกิ้งก่า *Sitana ponticeriana* อยู่ในวงศ์ Agamidae เช่นเดียวกับกิ้งก่าเขาเล็กพบว่ามีโอกาสในการพบประชากรกิ้งก่าเพศเมียมากกว่าเพศผู้ในช่วงฤดูฝน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาภาพรวมของจำนวนตัวที่สำรวจพบเปรียบเทียบกันระหว่างฤดูฝน และฤดูแล้ง ผลการสำรวจพบว่าในฤดูฝนสำรวจพบกิ้งก่าได้มากกว่าซึ่งโอกาสการพบกิ้งก่าที่สูงในช่วงฤดูฝนอาจมีความสัมพันธ์กับแมลงซึ่งเป็นอาหารของกิ้งก่าเนื่องจาก ดารินี และคณะ (2562) พบความแตกต่างของชนิดอาหารในกองมูลกิ้งก่าเขาเล็กบริเวณป่าดิบเขา ในพื้นที่สงวนชีวมณฑลแม่สา-คอกม้า รายงานว่าฤดูฝนมีความหลากหลายของแมลง

มากกว่าในฤดูแล้ง โดยฤดูฝนพบแมลงที่เป็นอาหารของกิ้งก่าเขาเล็ก 10 อันดับ ส่วนฤดูแล้งพบเพียง 3 อันดับ ดังนั้นเมื่ออาหารมีน้อยในช่วงฤดูแล้งอาจทำให้กิ้งก่าเขาเล็กมีพฤติกรรมการจำศีลในระยะสั้น (torpor) ซึ่งคล้ายกับการศึกษาของ Germano *et al.* (1994) ที่ระบุว่า blunt-nosed leopard lizard ตัวเต็มวัยจะอาศัยอยู่ใต้ดินในช่วงที่อาหารในธรรมชาติมีอยู่น้อย

ผลการศึกษาความหนาแน่นของประชากรกิ้งก่าเขาเล็กตามฤดูกาล ทั้ง 5 session พบว่า session ที่ 1 มีความหนาแน่นของประชากรเพศผู้ 31.76±6.03 ตัวต่อเฮกตาร์ และเพศเมีย 35.98±6.78 ตัวต่อเฮกตาร์ session ที่ 2 มีความหนาแน่นของประชากรเพศผู้และเพศเมีย 56.96±27.19 และ 64.52±30.77 ตัวต่อเฮกตาร์ session ที่ 3 มีความหนาแน่นของประชากรเพศผู้และเพศเมีย 46.04±9.79 และ 52.15±11.03 ตัวต่อเฮกตาร์ session ที่ 4 ความหนาแน่นของประชากรเพศผู้และเพศเมียเท่ากับ 6.18±1.84 และ 6.70±2.08 ตัวต่อเฮกตาร์ และ session ที่ 5 มีความหนาแน่นของประชากรเพศผู้ 59.49±14.43 ตัวต่อเฮกตาร์ เพศเมีย 67.34±16.28 ตัวต่อเฮกตาร์ (Figure 1) ซึ่งสัมพันธ์กับการศึกษาของ Jammes *et al.* (2006) ซึ่งศึกษาความแปรปรวนของสภาพอากาศกับความหนาแน่นของกิ้งก่า โดยพบว่าในช่วงฤดูแล้งประชากรกิ้งก่ามีความหนาแน่นเฉลี่ยน้อยกว่าฤดูอื่น แต่กิ้งก่ามีการเติบโตเร็วขึ้นในระยะเวลาอันสั้น หากเกิดช่วงฤดูแล้งยาวนานขึ้นอาจทำให้เกิดการตาย และเกิดการสูญพันธุ์ของประชากรได้ในอนาคต นอกจากนี้การศึกษาของ Dubey (2010) ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่ออัตราส่วนเพศของประชากรลูกหลานกิ้งก่า ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลจากภาวะโลกร้อนมีผลต่อการปรากฏของเพศกิ้งก่าในช่วงที่ทำการศึกษาอีกด้วย

การเคลื่อนที่ตามฤดูกาลของกิ้งก่าเขาเล็ก

การศึกษาการเคลื่อนที่เฉลี่ยของกิ้งก่าเขาเล็กในแต่ละช่วงที่ทำการศึกษาทั้ง 5 session พบว่าในแต่ละ session กิ้งก่าเขาเล็กมีการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน (Figure 2) โดยใน session ที่ 1 ฤดูฝน ปี 2017 มีระยะทางการเคลื่อนที่เฉลี่ยเท่ากับ 50.71±5.73 เมตร session ที่ 2 ฤดูแล้ง ปี 2018 มีระยะทางการเคลื่อนที่เฉลี่ยเท่ากับ 22.24±5.10 เมตร session ที่ 3 ฤดูฝน ปี 2018 มีระยะทางการเคลื่อนที่เฉลี่ยเท่ากับ 41.93±4.72 session ที่ 4 ฤดูแล้ง ปี 2019 มีระยะทางการเคลื่อนที่เฉลี่ยเท่ากับ 51.17±8.50 เมตร และ session ที่ 5 ฤดูฝน ปี 2019 มีระยะทางการเคลื่อนที่เฉลี่ยเท่ากับ 30.05±3.42 เมตร ผลของการเคลื่อนที่ของกิ้งก่าเขาเล็กสรุปได้ว่า ทั้ง 5 session ในฤดูฝน และฤดูแล้งที่ศึกษา กิ้งก่าเขาเล็กมีการเคลื่อนที่ที่ต่างกัน อาจเป็นเพราะอุณหภูมิที่ผันแปรไปตามสภาพอากาศที่ต่างกันในแต่ละปี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zamora-Camacho et al. (2012) กล่าวว่ารูปแบบกิจกรรมของกิ้งก่าที่ศึกษาสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามฤดูกาล อุณหภูมิที่ร้อนทำให้กิ้งก่าทำกิจกรรมน้อยลง เพื่อหลีกเลี่ยงจึงเป็นผลทำให้กิ้งก่าเขาเล็กในฤดูแล้ง session ที่ 2 มีการเคลื่อนที่เฉลี่ยน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทุก session

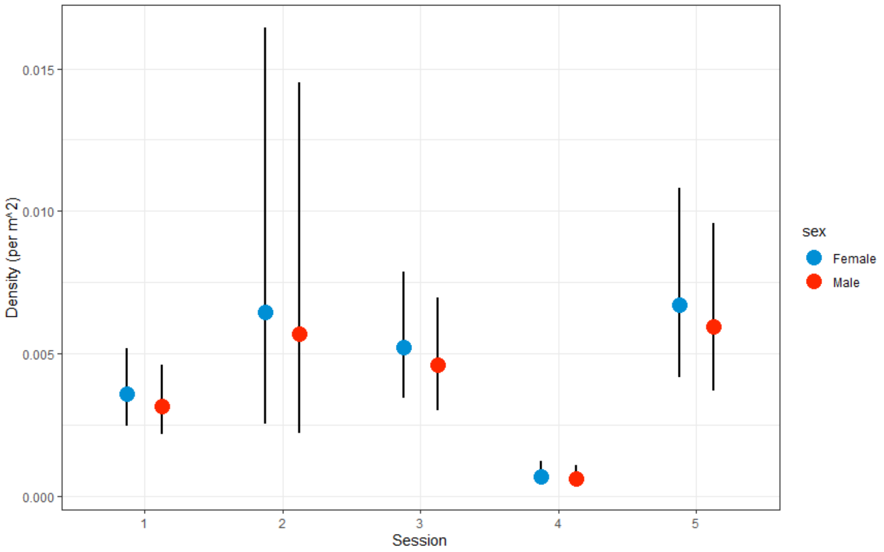


Figure 1 Population density of Cuvier's Spiny Lizard in 5 sessions at Mae Sa-Kog Biosphere Reserve.

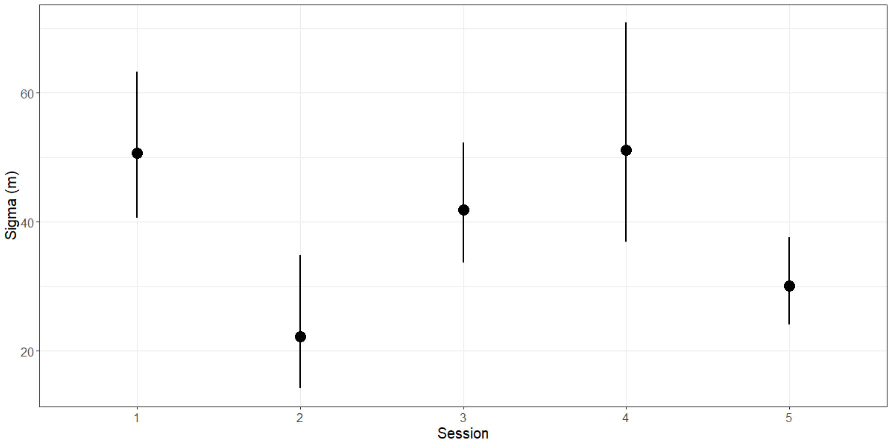


Figure 2 The average movement of Cuvier's Spiny Lizard in the study area each season all 5 session.

จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของกิ้งก่าเขาเล็กในพื้นที่ศึกษา 400 x 400 เมตร (Figure 3) พบว่ากิ้งก่าเขาเล็กมีการกระจายตัวแบบกลุ่ม (clumped) สามารถอธิบายได้ว่าพื้นที่บริเวณนั้นมีปัจจัยที่สำคัญต่อความต้องการจำเพาะของกิ้งก่าเขาเล็ก ซึ่งในพื้นที่บริเวณนั้นมีแหล่งน้ำ และมีความชื้นกว่าบริเวณอื่นเพราะถูกปกคลุมด้วยดงกล้วย ที่เป็นปัจจัยจำเฉพาะของกิ้งก่าเขาเล็ก ซึ่งต่างจากการศึกษาของ Spoecker (2015) กล่าวว่าการเคลื่อนที่ ที่ยาวนาน ไม่จำกัดเวลาในการศึกษาของ *Uta stansburiana stejnegeri* เป็นการเคลื่อนที่แบบกระจายตัว แต่กิ้งก่าเขาเล็กมีการศึกษาการเคลื่อนที่ที่แบ่งเป็นช่วงฤดูในแต่ละปี และจากการเคลื่อนที่ใน session ที่ 1, 3 และ5 ที่อยู่ในช่วงฤดูฝนมีการเคลื่อนที่ของกิ้งก่าเขาเล็กในแต่ละตัวมากกว่า และมีระยะไกลกว่า ในช่วงฤดูแล้งที่อยู่ใน session ที่ 2 และ4 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมในการออกมาทำกิจกรรมของกิ้งก่าเขาเล็กในช่วงฤดูฝนมากที่สุด

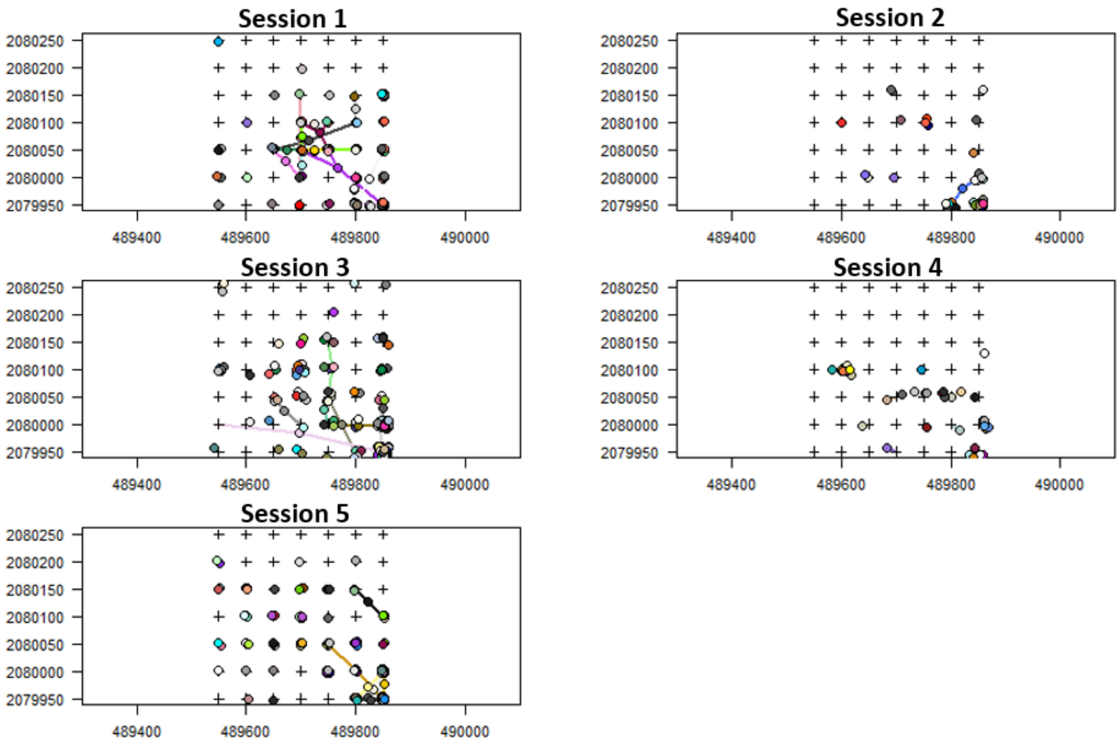


Figure 3 Movement of Cuvier's Spiny Lizard in the study area 400x400 m Each season all 5 session.

สรุป

การปรากฏของกิ้งก่าเขาเล็กมีโอกาสพบประชากรของเพศเมียได้มากกว่าเพศผู้ในฤดูฝน และมีโอกาสพบประชากรเพศผู้ได้มากกว่าเพศเมียในฤดูแล้ง ความหนาแน่นของประชากรกิ้งก่าเขาเล็กตามฤดูกาลพบว่ามีเพศเมียมากกว่าเพศผู้ทั้ง 5 session ใน session ที่ 1 เพศผู้ 31.76±6.03 ตัวต่อเฮกตาร์ และเพศเมีย 35.98±6.78 ตัวต่อเฮกตาร์ session ที่ 2 เพศผู้ 56.96±27.19 ตัวต่อเฮกตาร์ และเพศเมีย 64.52±30.77 ตัวต่อเฮกตาร์ session ที่ 3 เพศผู้ 46.04±9.79 ตัวต่อเฮกตาร์ และเพศเมีย 52.15±11.03 ตัวต่อเฮกตาร์ session ที่ 4 เพศผู้ 6.18±1.84 ตัวต่อเฮกตาร์ และเพศเมีย 6.70±2.08 ตัวต่อเฮกตาร์ และ session ที่ 5 เพศผู้ 59.49±14.43 ตัวต่อเฮกตาร์ เพศเมีย 67.34±16.28 ตัวต่อเฮกตาร์ การเคลื่อนที่เฉลี่ยของกิ้งก่าเขาเล็ก ในแต่ละ session มีการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน โดยใน session ที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 มีระยะทางการเคลื่อนที่เฉลี่ยเท่ากับ 50.71±5.73, 22.24±5.10, 41.93±4.72, 51.17±8.50 และ 30.05±3.42 เมตร ตามลำดับ มีการปรากฏการกระจายของประชากรกิ้งก่าเขาเล็ก ทั้ง 5 session เป็นแบบกลุ่ม (clumped) ตามปัจจัยความต้องการจำเพาะในระบบนิเวศของกิ้งก่าเขาเล็ก

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้ยังขาดข้อมูลปัจจัยทางกายภาพ เช่น อุณภูมิ แสง ความชื้น และปริมาณน้ำฝน มาวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบการเคลื่อนที่เพื่อใช้ในการทำนายที่แม่นยำมากขึ้นในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่า และพันธุ์พืช และอุทยานแห่งชาติดอยสุเทพ-ปุย ที่อนุญาตให้เข้าไปเก็บข้อมูลเพื่อทำงานวิจัยในพื้นที่สงวนชีวมณฑลแม่สา-คอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ประทีป ด้วงแค ที่สนับสนุนให้การช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ทั้งคำแนะนำ คำปรึกษา ข้อแก้ไขในการปรับแก้และพัฒนางานวิจัยนี้เสมอมา

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อน และน้อง ปริญญาเอกกับปริญญาโท ที่คอยให้ความช่วยเหลือต่างๆ มาโดยตลอด คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา ทั้งสอนประสบการณ์ต่างๆ เป็นอย่างดี จนงานวิจัยชิ้นนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

กิตติพงศ์ เลิศรุ่งโรจน์ และวุฒิ ทักษิณธรรม. 2560. ความหลากชนิดและรูปแบบการเปลี่ยนแปลงพรรณสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกและสัตว์เลื้อยคลาน ที่บริเวณคอคอดกระ อำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. **วารสารสัตว์ป่าเมืองไทย** 24(1): 1-12.

ดารินี สำราญรื่น, จิราภรณ์ เทียมพันธ์พงศ์, ยอดชาย ช่วยเงิน และประทีป ด้วงแค 2562. อาหารของกิ้งก่าเขาเล็กบริเวณป่าดิบเขา ในพื้นที่สงวนชีวมณฑลแม่สา-คอกม้า จังหวัดเชียงใหม่, น. 179-187. *ใน* การประชุมการป่าไม้ ประจำปี พ.ศ. 2562. ม.ป.ท.: องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้

บุษบง กาญจนสาขา, อัมพรพิมล ประยูร, กนกอร ทองใหญ่, เผด็จ บุญขาว และครินทร์ หิรัญไกรสาส. 2555. **คู่มือการสำรวจความหลากหลายของสัตว์ป่า**. กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

ปิยวรรณ นิยมวัน, ไพรวัลย์ ศรีสม และปริญญา ภวังคะนันทน์. 2560. **โครงการวิจัยนิเวศวิทยาป่าไม้ ระยะยาว: สัตว์เลื้อยคลานห้วยขาแข้ง**. ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ยุวดี พลพิทักษ์. 2557. **อาหารของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกบริเวณป่าดิบเขา อุทยานแห่งชาติดอยสุเทพ–ปุย จังหวัดเชียงใหม่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Carroll, R.L. 1997. **Patterns and Processes in Vertebrate Evolution**. Cambridge University Press, Cambridge.

Das, I. 2010. **Reptiles of Thailand & South-East Asia**. Tien Wah Press (Pte) Ltd. Singapore Northwest

Marine Technology. 2017. VISIBLE IMPLANT ELASTOMER TAGS. from https://www.nmt.us/visible-implant-elastomer, March 18, 2018.

Dubey, S. and R. Shine. 2010. Predicting the effects of climate change on reproductive fitness of anendangered montane lizard, *Eulamprus leuraensis* (Scincidae). **Climatic Change** 107(3): 531-547.

Germano, D.J., D.F. Williams and W. Tordoff III. 1994. Effect of drought on blunt-nosed leopard lizards (*Gambelia sila*). **Northwestern Naturalist** 75:11-19.

Jammes, S.C., M. Massot, P. Aragon and J. Clobert. 2006. Global warming and positive fitness response in mountain populations of common lizards Lacerta vivipara. **Global Change Biology**12(2): 392–402.

Northwest Marine Technology. 2017. **Visible Implant Elastomer Tags**. from: https://www.nmt.us/visible-implant-elastomer, March 18, 2018.

Pal, A., M.M. Swain and S. Rath. 2010. Observation on microhabitat use and activity patterns in *Sitana ponticeriana* (SAURIA: AGAMIDAE). **Russian Journal of Herpetology** 17(1): 22-30.

Spoecker, P.D. 2015. Movements and Seasonal Activity Cycles of the Lizard *Uta stansburiana stejnegeri*. University of Notre Dame. **The American Midland Naturalist** 77(2) 484-494.

Sutherland C., J.A. Royle and D.W. Linden. 2019. oSCR: a spatial capture–recapture R package for inference about spatial ecological processes. **Ecography** 42: 1–11.

White, G. C., D. R. Anderson, K. P. Burnham and D. L. Otist. 1982. **Capture-Recapture and Removal Methods for Sampling Closed Populations**. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.

Zamora-Camacho, F.J., S. Reguera, G. Moreno-Rueda and J.M. Pleguezuelos. 2012. Patterns of seasonal activity in Mediterranean lizard along a 2200 m altitudinal gradient. **Journal of Thermal Biology** 38(2013): 64-69

ผลกระทบของไฟต่อการเติบโตและการเจริญทดแทนตามธรรมชาติในป่าเต็งรังผสมสน โครงการหลวงบ้านวัดจันทร์ จังหวัดเชียงใหม่

Effect of Fire on Growth and Natural Regeneration in Pine-Dipterocarp Forest at Ban Watchan Royal Project, Chiangmai Province

เพ็ญสุรัศมิ์ เกียรติโภคะ[1*] กอบศักดิ์ วันธงไชย[1] และ วาทินี สวนผกา[1]

Phensurat Kiatphokha[1*], Kobsak Wanthongchai[1] and Wathinee Suanpaga[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเติบโตและการเจริญทดแทนตามธรรมชาติในป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าทุกปี และไม่มีไฟป่าเกิดขึ้นไม่น้อยกว่า 6 ปี โครงการหลวงบ้านวัดจันทร์ จังหวัดเชียงใหม่ ได้ดำเนินการตั้งแต่เดือนเมษายน พ.ศ. 2561 ถึงเมษายน พ.ศ. 2562 โดยวางแปลงขนาด 40x40 เมตร พื้นที่ละ 3 แปลง รวม 6 แปลง ผลการศึกษาพบว่า ชนิดพันธุ์ไม้ที่สามารถพบได้ทั่วไปป่าเต็งรังผสมสนมี 3 ชนิด คือ สนสองใบ เหียง และรักใหญ่ ส่วนสนสามใบพบในเฉพาะพื้นที่มีไฟเท่านั้น สำหรับการเติบโตและการเจริญทดแทนตามธรรมชาติ พบว่าป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่า มีพันธุ์ไม้ทั้งหมด 9 ชนิด ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.20 ต่อปี ค่าความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้ เท่ากับ 1.22 ส่วนในป่าเต็งรังผสมสนที่ไม่มีไฟป่า มีพันธุ์ไม้ทั้งหมด 13 ชนิด ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.73 ต่อปี ค่าความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้ เท่ากับ 1.38 จากผลการทดลองจะเห็นว่าในป่าเต็งรังผสมสนที่ไม่มีไฟป่า มีจำนวนชนิดพันธุ์ไม้ ความหนาแน่นเฉลี่ย ค่าความหลากหลายมากกว่าป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่า จึงกล่าวได้ว่าไฟป่ามีผลกระทบต่อการเติบโตและการเจริญทดแทนตามธรรมชาติทั้งในด้านของการลดลงของจำนวนชนิดพันธุ์ ความหนาแน่น การเติบโตทั้งในด้านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูงของไม้รุ่น และกล้าไม้ ขณะที่ไม้ใหญ่ได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อย ดังนั้น การควบคุมไฟป่าในป่าเต็งรังผสมสนเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการฟื้นฟูระบบนิเวศได้ ซึ่งในระยะยาวหากยังไม่มีมาตรการในการจัดการไฟป่าที่มีประสิทธิภาพ กระบวนการเจริญทดแทนของสังคมพืชอาจได้รับผลกระทบจนทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นทุ่งหญ้าได้ในที่สุด

ABSTRACT

The objectives of this study were to study the growth and natural regeneration in the pine-dipterocarp forest (PDF) with annual fire and without fire occurred for at least 6 years at Ban Watchan Royal Project, Chiangmai province. The results showed that there were 3 kinds of plants that could be generally found in PDF, Pinus merkusii Jungh. & de Vriese, Dipterocarpus obtusifolius Teijsm. ex Miq., and Gluta usitata (Wall.) Ding Hou. The *P. kesiya* Royle ex Gordon was found only in the fire area. The study result of PDF found 9 kinds of plants that have the average density increased by 1.20 percent per year. The species diversity was 1.22. The study result of PDF without fire found 13 kinds of plants that have the average density increased by 2.73 percent per year. The species diversity was 1.38. From those results, the growth and natural regeneration of PDF without fire had the values of the density, the number of species and species diversity more than the values of those in PDF with annual fire. Those results indicated that forest fire affected the growth and natural regeneration, both in terms of decreasing number of species, density, and the growth of diameter and height of sapling and seedling, while trees were only slightly affected

Key words: pine-dipterocarp forest, forest fire, growth, regeneration

* Corresponding author; e-mail address: **Phensurat@hotmail.com**

[1]คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1]Faculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900

คำนำ

โครงการหลวงบ้านวัดจันทร์เป็นป่าสนที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ทางภาคเหนือและยังเป็นป่าสนที่มีพื้นที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย มีสภาพพื้นที่เป็นป่าเต็งรังผสมสน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นชนิดย่อย โดยพิจารณาตามชนิดพันธุ์ไม้เด่นแบ่งได้เป็น 3 สังคมย่อย คือ 1) ป่าเต็งรังผสมสนที่มีไม้เหียงเป็นพันธุ์ไม้เด่น 2) ป่าเต็งรังผสมสนที่มีไม้พลวงเป็นพันธุ์ไม้เด่น 3) ป่าเต็งรังผสมสนที่มีไม้เต็งเป็นพันธุ์ไม้เด่น (ตฤณ และคณะ, 2556) โดยป่าเต็งรังจัดเป็นสังคมสุดยอดด้วยไฟ (fire climax community) ซึ่งการเกิดไฟป่าเป็นประจำนั้น มีทั้งประโยชน์และโทษ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความรุนแรงและความถี่ของไฟ ถ้าความรุนแรงไฟน้อยก็จะมีประโยชน์ต่อพืชบางชนิด เช่น ช่วยเพิ่มการงอกของเมล็ดไม้ ช่วยเตรียมพื้นที่ในการเจริญทดแทนตามธรรมชาติ เป็นต้น แต่ถ้ามีความรุนแรงไฟมากก็จะมีโทษ ทำให้พื้นที่ป่าไม้ถูกทำลายหรือแปรสภาพให้เสื่อมโทรมลง โดยไฟจะมีผลต่อการเติบโตและการตายของไม้ยืนต้นน้อยมาก แต่จะมีผลต่อไม้รุ่นและกล้าไม้ทั้งด้านการเติบโตและการตาย (วรพรรณ และ สันต์, 2551) ป่าเต็งรังที่ถูกไฟไหม้ทุกปีจะกลายสภาพเป็นป่าโปร่งความหนาแน่นของต้นไม้น้อย การเติบโตช้าลง ขาดการทดแทนตามธรรมชาติ เกิดรอยแผลบนต้นไม้ทำให้เกิดโรคและแมลงได้ง่าย และยังทำให้พื้นที่ที่เกิดไฟไหม้ปราศจากสิ่งปกคลุมเกิดการกร่อนของดินและเกิดตะกอนสะสมในลำน้ำ นอกจากนี้ไฟป่ายังทำลายที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่าและความสวยงามของพื้นที่ กล่าวได้ว่าไฟป่าเป็นตัวการหนึ่งที่มีความสำคัญในการทำลายทรัพยากรป่าไม้และสิ่งแวดล้อม

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเติบโตและการเจริญทดแทนตามธรรมชาติบริเวณพื้นที่มีไฟป่าเป็นประจำทุกปี เปรียบเทียบกับพื้นที่ไม่มีไฟเกิดขึ้นเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 6 ปี (ตั้งแต่ปี 2555 ถึงปัจจุบัน) ในป่าเต็งรังผสมสนที่มีไม้เหียงเป็นพันธุ์ไม้เด่น โครงการหลวงบ้านวัดจันทร์ จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดการฟื้นฟูระบบนิเวศป่าเต็งรังผสมสนต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. พื้นที่ศึกษา

ป่าเต็งรังผสมสนที่มีไม้เหียงเป็นพันธุ์ไม้เด่น บริเวณโครงการหลวงบ้านวัดจันทร์ จังหวัดเชียงใหม่ มีพันธุ์ไม้เรือนยอดที่มีความสูงมากกว่าพันธุ์ไม้ชนิดอื่นในป่า คือ ไม้สน ซึ่งมีทั้งไม้สนสองใบและสนสามใบ แต่ส่วนมากจะเป็นไม้สนสองใบ ไม้พืชล่างที่พบมาก คือ ก่อแพะ และเหียง

2. การวางแปลงเก็บข้อมูล

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ทรีตเมนต์ คือ แปลงที่มีไฟป่าเป็นประจำเกือบทุกปี และแปลงที่ไม่มีไฟป่าเกิดขึ้นเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 6 ปี (ตั้งแต่ปี 2555 ถึงปัจจุบัน) วางแปลงขนาด 40x40 เมตร พื้นที่ละ 3 แปลง รวม 6 แปลง พร้อมบันทึกตำแหน่งแปลงตัวอย่างทุกแปลงด้วย GPS ซึ่งแต่ละแปลงจะแบ่งเป็นแปลงย่อยขนาด 10x10 เมตร สำหรับศึกษาไม้ใหญ่ 4x4 เมตร สำหรับศึกษาไม้รุ่น และ 1x1 เมตร สำหรับศึกษากล้าไม้ โดยศึกษาจากการเก็บข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) ความสูง ชนิด และจำนวนของไม้ใหญ่ และไม้รุ่น ส่วนกล้าไม้ใช้เพียงการบันทึกชนิดและจำนวนเท่านั้น ทั้งนี้ จะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 6 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี (Figure 1) หากพบต้นไม้ที่เกิดใหม่ในแปลงจะทำการวัดการเติบโตทางเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง และติดเบอร์ที่ต้นไม้เพิ่ม

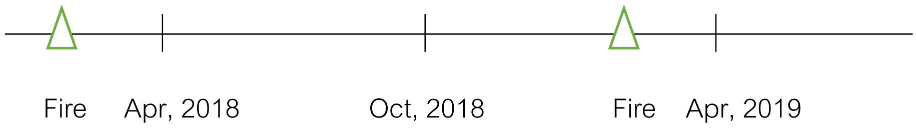


Figure 1 Time line.

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้ในป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าและไม่มีไฟป่า โดยวิเคราะห์สังคมพืช เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงปริมาณ ได้แก่ ดัชนีค่าความสำคัญ (important value index หรือ IVI และดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ (species diversity index) โดยใช้ Shannon-Wiener function (Krebs, 1985)

1.1 ดัชนีค่าความสำคัญ (IVI) = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ + ความถี่สัมพัทธ์ + ความเด่นสัมพัทธ์

1.2 ดัชนีค่าความหลากหลายของชนิดพันธุ์ (H’) = $-\sum (p_i \ln p_i)$

เมื่อ H’ = ดัชนีค่าความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้

S = จำนวนชนิดพันธุ์ไม้ทั้งหมด

p_i = สัดส่วนจำนวนต้นของพันธุ์ไม้ชนิด i ต่อจำนวนต้นของพันธุ์ไม้ทั้งหมด

2. การเติบโตและการเจริญทดแทนตามธรรมชาติ จากค่าความหนาแน่น ความโต ความสูง อัตราการเติบโต โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ร้อยละ เป็นต้น และทำการเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่มีไฟป่าและพื้นที่ไม่มีไฟป่า โดยใช้สถิติ independent t-test

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. โครงสร้างและองค์ประกอบของสังคมพืช

พิจารณาโครงสร้างและองค์ประกอบของสังคมพืชในป่าเต็งรังผสมสน จากจำนวนชนิดพันธุ์ ความหลากหลายของชนิดพันธุ์ ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง และความหนาแน่น ปรากฏดัง Table 1

1.1 ป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่า

พันธุ์ไม้มีทั้งหมด 9 ชนิด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของไม้ใหญ่ และไม้รุ่น เท่ากับ 19.08 และ 2.08 เซนติเมตร มีความสูงเฉลี่ยของไม้ใหญ่ และไม้รุ่น เท่ากับ 13.34 และ 1.52 เมตร มีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ เท่ากับ 79.44, 106.25 และ 3,133.33 ต้นต่อไร่ มีความหลากหลายของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ เท่ากับ 1.22, 0.69 และ 0.2

จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ความถี่สัมพัทธ์ และความเด่นสัมพัทธ์ เพื่อประเมินหาดัชนีค่าความสำคัญ (important value index หรือ IVI) ทำให้ทราบถึงชนิดไม้ใหญ่ที่มีดัชนีค่าความสำคัญ 5 อันดับที่มากที่สุด ได้แก่ เหียง (*Dipterocarpus obtusifolius* Teijsm. ex Miq.) เท่ากับ 142.63 รองลงมาได้แก่ สนสองใบ (*Pinus merkusii* Jungh. & de Vriese) สนสามใบ (*P. kesiya* Royle ex Gordon) รักใหญ่ (*Gluta usitata* (Wall.) Ding Hou) และสารภีป่า (*Anneslea fragrans* Wall.) ซึ่งมีดัชนีค่าความสำคัญ เท่ากับ 77.89, 44.55, 19.49 และ 6.71 ตามลำดับ

1.2 ป่าเต็งรังผสมสนที่ไม่มีไฟป่า

พันธุ์ไม้มีทั้งหมด 13 ชนิด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของไม้ใหญ่ และไม้รุ่น เท่ากับ 13.99 และ 2.69 เซนติเมตร มีความสูงเฉลี่ยของไม้ใหญ่ และไม้รุ่น เท่ากับ 9.26 และ 2.31 เมตร มีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ เท่ากับ 111.33, 431.25 และ 7,133.33 ต้นต่อไร่ มีความหลากหลายของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ เท่ากับ 1.38, 1.84 และ 0.60

จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ความถี่สัมพัทธ์ และความเด่นสัมพัทธ์ ของป่าเต็งรังผสมสนที่ไม่มีไฟที่มีดัชนีค่าความสำคัญ 5 อันดับมากที่สุด ได้แก่ สนสองใบ เท่ากับ 136.81 รองลงมา ได้แก่ เหียง ก่อหม่น (*Lithocarpus elegans*. Hatus. ex Soepadmo) รักใหญ่ และไก๋แดง (*Ternstroemia gymnanthera* Bedd.) ซึ่งมีดัชนีค่าความสำคัญ เท่ากับ 107.45, 16.39, 11.71 และ 9.09 ตามลำดับ

Table 1 Number of species, average diameter, average height, density and species.

Parameters	Tree		Sapling		Seedling	
	Burned	Unburned	Burned	Unburned	Burned	Unburned
Number of species	9	13	2	10	2	4
Species diversity	1.22	1.38	0.69	1.84	0.20	0.60
Average diameter (cm)	19.08	13.99	2.08	2.69		
Average height (m)	13.34	9.26	1.52	2.31		
Density (tree/rai)	79.44	111.33	106.25	431.25	3,133.33	7,133.33

อย่างไรก็ตามการเกิดไฟป่าทุกปี จะทำให้จำนวนชนิดพันธุ์ไม้ ความหนาแน่น ความหลากหลายลดลง (สุกัญญา, 2532) ซึ่งการศึกษาครั้งนี้พบจำนวนชนิดพันธุ์ไม้ของป่าเต็งรังผสมสนที่ไม่มีไฟป่า (13 ชนิด) มากกว่าป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าทุกปี (9 ชนิด) ความหนาแน่นของต้นไม้ในป่าเต็งรังผสมสนที่ไม่มีไฟป่า (111.33 ต้น/ไร่) มากกว่าป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าทุกปี (79.44 ต้น/ไร่) ความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้ในป่าเต็งรังผสมสนที่ไม่มีไฟป่า (1.38) มากกว่าป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าทุกปี (1.22) และเมื่อพิจารณาชนิดไม้ที่สามารถพบได้ทั่วไปมี 3 ชนิดคือ สนสองใบ เหียง และรักใหญ่ เนื่องจากพบได้ทั้งในพื้นที่มีไฟป่าและไม่มีไฟป่า ส่วนสนสามใบพบในเฉพาะพื้นที่มีไฟเท่านั้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษาของ ตฤณ และคณะ (2556)

2. การเติบโตและการเจริญทดแทนตามธรรมชาติ

จากการศึกษาข้างต้น พบว่า พันธุ์ไม้ที่สามารถพบได้ทั่วไปมี 3 ชนิดคือ สนสองใบ เหียง และรักใหญ่ ดังนั้น จึงนำชนิดพันธุ์ไม้ดังกล่าว มาทำการศึกษาการเติบโตระหว่างพื้นที่ที่มีไฟป่าและไม่มีไฟป่า ปรากฏดัง Table 2 พบว่า ไม้ใหญ่ และไม้รุ่นของทั้งสองพื้นที่ที่ทำการศึกษาที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูงเฉลี่ยมากที่สุด คือ สนสองใบ รองลงมา ได้แก่ รักใหญ่ และเหียง ตามลำดับ

Table 2 Diameter at breast height (DBH) and height (H) of trees and saplings.

Species	Tree				Sapling			
	Burned		Unburned		Burned		Unburned	
	DBH (cm)	H (m)	DBH (cm)	H (m)	DBH (cm)	H (m)	DBH (cm)	H (m)
P. latteri	38.50	23.39	16.70	11.77	3.65	2.88	2.74	2.88
D.obtusifolius	14.73	9.71	12.70	7.80	2.88	2.06	3.08	1.95
G. usitata	18.56	10.15	14.48	9.75	2.60	1.60	-	-

2.1 อัตราการเติบโต

จากเก็บข้อมูล และติดตามผลการการเติบโตของพันธุ์ไม้ในป่าเต็งรังผสมสนทุก 6 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี เพื่อทำการศึกษาหาอัตราการเติบโตต่อปีของพันธุ์ไม้เด่นหรือพันธุ์ไม้ที่สามารถพบได้โดยทั่วไปในป่าเต็งรังผสมสนได้ผลการศึกษา ดังนี้

1. สนสองใบ จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า อัตราการเติบโตทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าและไม่มีไฟป่ามีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติทางสถิติ แต่อัตราการเติบโตทางด้านความสูง พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นกล่าวได้ว่าไฟป่ามีผลกระทบต่ออัตราการเติบโตของไม้ใหญ่เพียงเล็กน้อย ส่วนในไม้รุ่น พบว่า อัตราการเติบโตทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลางมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และความสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ กล่าวได้ว่าไฟมีผลกระทบต่อการเติบโตของไม้รุ่น จาก Table 3 จะเห็นว่าอัตราการเติบโตทางด้านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูงในที่ไม่มีไฟป่าสูงกว่าในที่มีไฟป่า

2. เหียง จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยทางสถิติในไม้ใหญ่และไม้รุ่น แสดงให้เห็นว่า อัตราการเติบโตทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูงระหว่างป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่า และไม่มีไฟป่ามีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 3) แต่เมื่อเทียบอัตราการเติบโต พบว่า ไม้เหียงในที่มีไฟมีอัตราการเติบโตที่ดีกว่าในที่ไม่มีไฟ

3. รักใหญ่ จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยทางสถิติในไม้ใหญ่ แสดงให้เห็นว่า อัตราการเติบโตทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูงระหว่างป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าและไม่มีไฟป่ามีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 3) แต่เมื่อเทียบอัตราการเติบโต พบว่า ไม้รักใหญ่ในที่มีไฟมีอัตราการเติบโตที่ดีกว่าในที่ไม่มีไฟ

เมื่อพิจารณาการเติบโตในพื้นที่มีไฟ พบว่า ชนิดไม้ใหญ่ที่มีการอัตราการเติบโตมากสุด คือ รักใหญ่ ส่วนชนิดไม้รุ่นที่มีอัตราการเติบโตมากสุด คือ เหียง สำหรับพื้นที่ไม่มีไฟป่า พบว่า ชนิดไม้ใหญ่ และไม้รุ่นที่มีการอัตราการเติบโตมากสุด คือ สนสองใบ

Table 3 Growth rates of trees and saplings.

Species	Tree						Sapling			
	P. latteri		*D.obtusifolius*		*G. usitata*		*P. latteri*		*D. obtusifolius*	
	DBH (cm)	H (m)	DBH (cm)	H (m)	DBH (cm)	H (m)	DBH (cm)	H (m)	DBH (cm)	H (m)
Burned	0.0043	0.0387	0.0062	0.0506	0.0073	0.0020	0.0083	0.0415	0.0736	0.0459
Unburned	0.0510	0.0446	0.0042	0.0222	0.0022	0.0014	0.1973	0.1448	0.0354	0.0375
p-value	0.82^{ns}	0.03^{*}	0.17^{ns}	0.49^{ns}	0.31^{ns}	0.88^{ns}	0.01^{*}	0.002^{**}	0.31^{ns}	0.24^{ns}

Remark ns = non-significant difference ($p \geq 0.05$)

* = significant difference ($p<0.05$)

** = highly significant difference ($p<0.01$)

2.2 การเจริญทดแทนตามธรรมชาติ

จากเก็บข้อมูล และติดตามผลการเจริญทดแทนตามธรรมชาติของพันธุ์ไม้ในป่าเต็งรังผสมสนทุก 6 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี ได้ผลการศึกษาปรากฏดัง Table 4

Table 4 Densities of trees, saplings and seedlings.

Area	Time (month)	Density (tree/rai)					
		Tree		Sapling		Seedling	
		Burned	Unburned	Burned	Unburned	Burned	Unburned
	1	79.00	110.00	112.50	412.50	3,900.00	7,000.00
	6	80.00	111.00	106.25	418.75	3,100.00	7,200.00
	12	80.00	113.00	100.00	462.50	2,400.00	7,200.00
	average	79.44	111.33	106.25	431.25	3,133.33	7,133.33
	sd	0.38	1.33	6.25	27.24	750.56	115.47
P-Value		0.001^{**}		0.002^{**}		0.012^{*}	

โดยครั้งแรกที่เริ่มวางแปลงศึกษา (เมษายน พ.ศ. 2561) พบว่า พื้นที่มีไฟป่ามีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ เท่ากับ 79, 112.50 และ 3,900 ต้นต่อไร่ ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ที่ไม่มีไฟป่า มีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ เท่ากับ 110, 412.50 และ 7,000 ต้นต่อไร่ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า พื้นที่มีไฟป่ามีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ ต่ำกว่า พื้นที่ไม่มีไฟป่า

จากการเก็บข้อมูลหลังจากเริ่มวางแปลงศึกษา 6 เดือน (ตุลาคม พ.ศ. 2561) พบว่า พื้นที่มีไฟป่ามีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ เท่ากับ 80, 106.25 และ 3,100 ต้นต่อไร่ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับครั้งแรกพบว่าในไม้รุ่น และกล้าไม้มีความหนาแน่นลดลง ส่วนพื้นที่ที่ไม่มีไฟป่ากลับมีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เท่ากับ 111, 418.75 และ 7,200 ต้นต่อไร่ ตามลำดับ

และจากการเก็บข้อมูลหลังจากเริ่มวางแปลงศึกษา 12 เดือน (เมษายน พ.ศ. 2562) พบว่า พื้นที่มีไฟป่ามีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ เท่ากับ 80, 100 และ 2,400 ต้นต่อไร่ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับครั้งแรกพบว่าในไม้รุ่น และกล้าไม้มีความหนาแน่นลดลง ส่วนพื้นที่ที่ไม่มีไฟป่ากลับมีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เท่ากับ 111, 431.25 และ 7,200 ต้นต่อไร่ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการเจริญทดแทนตามธรรมชาติ พบว่า พื้นที่มีไฟป่า มีความหนาแน่นเฉลี่ยของไม้ใหญ่เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.20 ต่อปี จะเห็นได้ว่าไฟผิวดินในป่าเต็งรังผสมสนไม่มีผลต่อความหนาแน่นของไม้ใหญ่ (คนึงนิจ, 2539 และ บุญส่ง, 2541) ซึ่งแตกต่างจากความหนาแน่นเฉลี่ยของไม้รุ่น และกล้าไม้ ที่มีแนวโน้มที่ลดลงร้อยละ 11.11 และ 38.46 ต่อปี ตามลำดับ กล่าวได้ว่าไฟผิวดินมีผลต่อการเติบโตและการตายของไม้รุ่น และกล้าไม้ (วรพรรณ และ สันต์, 2551) สอดคล้องกับ กอบศักดิ์ (2555) หลังจากเกิดไฟป่า ความหนาแน่นต่อพื้นที่ของไม้รุ่นและกล้าไม้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งในลักษณะที่เพิ่มขึ้น ลดลง และไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากไม้รุ่น และกล้าไม้ได้รับผลกระทบโดยตรงจากอิทธิพลของไฟป่านั้นเอง ส่วนพื้นที่ไม่มีไฟป่า มีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้รุ่น และกล้าไม้ เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.73, 12.12 และ 2.86 ต่อปี ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ พบว่า ความหนาแน่นของไม้ใหญ่ และไม้รุ่นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ส่วนในกล้าไม้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ชนิดพันธุ์ไม้ที่เป็นโครงสร้างและองค์ประกอบของสังคมพืช รวมถึงการเติบโตและการเจริญทดแทนตามธรรมชาติในพื้นที่มีไฟป่าและไม่มีไฟป่ายังไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากมีการควบคุมไฟป่าในพื้นที่เพียง 6 ปี จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของสังคมพืชยังไม่ปรากฏให้เด่นชัด อย่างไรก็ตามหากเกิดไฟป่าเป็นประจำปีทุกปีจะทำให้เกิดผลเสียมากกว่าผลดี เนื่องจากไฟมีผลกระทบทำให้การเติบโตและการเจริญทดแทนตามธรรมชาติลดลง โอกาสที่ไม้รุ่นและกล้าไม้จะพัฒนาไปเป็นไม้ต้นก็เป็นไปได้ยาก แต่หากมีการควบคุมไฟเป็นระยะ ก็อาจทำให้เกิดผลดีมากกว่า เนื่องจากไม้รุ่น และกล้าไม้เกิดการฟื้นตัว ทำให้มีอัตราการเติบโตที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงมีโอกาสที่จะเติบโตไปเป็นไม้ใหญ่ได้มากขึ้น ทั้งนี้ หากป้องกันไฟไว้เป็นเวลานานก็อาจจะเกิดผลเสียต่อพรรณพืชได้เช่นกัน ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกัน รักษาและกระตุ้นให้มีการเติบโตและเจริญทดแทนตามธรรมชาติ ควรมีมาตรการควบคุมไฟที่เหมาะสม ซึ่งผลการศึกษาของสุกัญญา (2532), คนึงนิจ (2539), บุญส่ง (2541) พบว่าระดับความถี่ที่เหมาะสมแก่การเกิดไฟในป่าเต็งรังผสมสนควรเป็น 4 ปีต่อครั้ง

สรุป

ป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าเป็นประจำทุกปี จะทำให้จำนวนชนิดพันธุ์ไม้ ความหนาแน่น ความหลากหลายลดลง (สุกัญญา, 2532) ซึ่งการศึกษาครั้งนี้พบจำนวนชนิดพันธุ์ไม้ของป่าเต็งรังผสมสนที่ไม่มีไฟป่า (13 ชนิด) มากกว่าป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าทุกปี (9 ชนิด) ความหนาแน่นของต้นไม้ในป่าเต็งรังผสมสนที่ไม่มีไฟป่า (111.33 ต้น/ไร่) มากกว่าป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าทุกปี (79.44 ต้น/ไร่) ความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้ในป่าเต็งรังผสมสนที่ไม่มีไฟป่า (1.38) มากกว่าป่าเต็งรังผสมสนที่มีไฟป่าทุกปี (1.22) ดังนั้น การควบคุมไฟป่าในป่าเต็งรังผสมสนเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการฟื้นฟูระบบนิเวศได้ ซึ่งในระยะยาวหากยังไม่มีมาตรในการจัดการไฟป่าที่มีประสิทธิภาพ กระบวนการเจริญทดแทนของสังคมพืชอาจได้รับผลกระทบจนทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นทุ่งหญ้าได้ในที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. กอบศักดิ์ วันธงไชย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และแนะนำต่างๆ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่โครงการหลวงบ้านวัดจันทร์ จังหวัดเชียงใหม่ และเพื่อนพี่น้องวนศาสตร์ที่ช่วยให้การเก็บข้อมูลสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กอบศักดิ์ วันธงไชย และสุภัทรา ถึกสถิต. 2555. **การศึกษาประสิทธิภาพของแนวกันไฟเปียกในการป้องกันไฟป่าบริเวณพื้นที่แนวกันชนระหว่างพื้นที่เกษตรและพื้นที่ป่า**. **รายงานวิจัย.** สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

คนึงนิจ สุทธิชาติ 2539. **ผลกระทบของไฟต่อดินและพืช ณ อุทยานแห่งชาติภูกระดึง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ตฤณ เสรเมธากุล, สุนทร คำยอง, นิวัติ อนงค์รักษ์ และเกรียงศักดิ์ ศรีเงินยวง. 2556. ความหลากหลายชนิดพันธุ์ไม้และสภาพป่าสนผสมสน ในอำเภอกัลยาณิวัฒนา จังหวัดเชียงใหม่. **วารสารนเรศวรพะเยา** 6(1): 52-63.

บุญส่ง สมเพาะ. 2541. **แหล่งเชื้อเพลิงในป่าเต็งรังและป่าเบญจพรรณ ณ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง จังหวัดอุทัยธานี.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรพรรณ หิมพานต์ และ สันต์ เกตุปราณีต. 2551. ผลของไฟต่อพืชพรรณในป่าเต็งรังในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง จังหวัดอุทัยธานี. **วารสารวนศาสตร์** 27: 43-55.

สุกัญญา สุทธิวานิช. 2532. **ผลของความถี่ไฟต่อพรรณพืชในป่าเต็งรังสะแกราช จังหวัดนครราชสีมา.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุนทร ฉายวัฒนะ. 2546. **ผลของไฟป่าต่อกล้าไม้ ไม้รุ่น และการใช้ประโยชน์ของสัตว์กินพืช บางชนิดในป่าเต็งรังเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง จังหวัดอุทัยธานี.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Dhanmanonda, P. 1994. The forest growth cycle in various forest type. **Thai J. For.** 13: 68-80.

Krebs, C.J. 1985. Species diversity I: Theory, pp 513-542. *In* **Ecology: The Experimental Analysis of Distribution and Abundance.** 3rd ed., Harper & Row Publishers, New York.

การมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร กรณีศึกษา คลองนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง

Public Participation in the Conservation of Water Onion: Case Study from Khlong Naka, Suk Samran District, Ranong Province

นิติญา สังขนันท์[1*] ธิดารัตน์ คำล้อม[1] และ ขนิษฐา อีดเกิด[1]

Nitiya Sangkhanan[1*], Tidarat Kumlom[1] and Khanittha Eadkerd[1]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับการมีส่วนร่วมของประชาชน ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ซึ่งกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้โดยการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง คือ ประชาชนในพื้นที่ 2 หมู่บ้าน ได้แก่ หมู่ที่ 1 จำนวน 164 ครัวเรือน และหมู่ที่ 5 จำนวน 86 ครัวเรือน รวมทั้งหมด 250 ครัวเรือน โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการศึกษา สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ ค่าความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการศึกษาพบว่า ระดับการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร หมู่ที่ 1 และหมู่ที่ 5 โดยภาพรวมอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 3.97 และ 3.82 ตามลำดับ ปัญหาและอุปสรรคของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร หมู่ที่ 1 คือ ไม่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากภาครัฐหรือการปกครองส่วนท้องถิ่นมากที่สุด (ร้อยละ 27.1) และหมู่ที่ 5 คือ ประชาชนขาดความรู้และความเข้าใจในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารมากที่สุด (ร้อยละ 30.0) ข้อเสนอแนะของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารของทั้ง 2 หมู่บ้าน พบว่า ต้องการสนับสนุนงบประมาณในการฟื้นฟูอย่างต่อเนื่อง จัดทำสื่อเผยแพร่ และให้ผู้นำชุมชนมีการติดตามผลอย่างต่อเนื่อง

ABSTRACT

This research has the objective to study the levels of public participation, the problems, the obstacles and the public suggestions in the conservation of Water Onion. In this research, we applied the Purposive Sampling. The sample of the research were the local inhabitants in two villages. They are composed of 164 families of Moo 1 village and 86 families of Moo 5 village, in a total of 250 families. This research was carried out by using questionnaires. The statistics were analyzed by using frequency, percentage, average, and standard deviation. The result found that the levels of public participation in the conservation of Water Onion in Moo 1 and Moo 5 villages are in overall at a very low level. The averages are 3.97 and 3.82 percent respectively. The principal problem and obstacle of the Water Onion conservation in Moo 1 village is the lack of state or local government subvention (27.1 percent). The main problem and obstacle in Moo 5 village is the lack of knowledge and understanding about the Water Onion conservation (30.0 percent). For the public suggestion of the Water Onion conservation in both villages, it has been found that the inhabitants need budgetary subvention for restoring continuously Water Onion and for making publications and they need the chefs of the villages to follow consistently the results.

Key words: Public participation, conservation, Water Onion

* Corresponding author; e-mail address: nitiya.skn@gmail.com

[1]สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต ภูเก็ต 83000

[1]Environmental Science Program, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University, Phuket 83000

คำนำ

พลับพลึงธารมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Crinum thaianum* schulze เป็นพืชน้ำอยู่ในวงศ์พลับพลึง (Amaryllidaceae) มีชื่อสามัญ คือ Water Onion, Water lily, Thai Water Onion, Onion Plant และ Yellowish leaves lily หรือมีชื่ออื่นๆ ที่เรียกในแต่ละท้องถิ่น ได้แก่ หญ้าช้อง หอมน้ำ(ระนอง) ช้องนางคลี่ (บ้านนางย่อน) (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช, 2560) พลับพลึงธารถูกจัดอยู่ในบัญชีแดงของสหภาพเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ (IUCN Redlist) เป็นพืชเฉพาะถิ่นที่อยู่ในสถานะถูกคุกคามอย่างหนักในกลุ่มชนิดพันธุ์ที่ใกล้สูญพันธุ์ (Endangered) ของสำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เป็นพืชที่พบแห่งเดียวในโลก คือ บริเวณแม่น้ำลำคลองในเขตอำเภอกะเปอร์ อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง และ อำเภอคุระบุรี อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2559) ขณะนี้หน่วยงานต่างๆ ท้องถิ่นให้ความสำคัญในการพัฒนาและอนุรักษ์พลับพลึงธารให้เป็นพันธุ์ไม้หรือพืชน้ำที่สำคัญในระดับประเทศ

ปัจจุบันพลับพลึงธารมีแนวโน้มที่จะมีประชากรลดลงอย่างน่าเป็นห่วง ผลการสำรวจของ IUCN เมื่อปี พ.ศ. 2553-2554 ในลำคลองสายหลัก พบว่า มีพื้นที่การกระจายตัวลดลงจาก 10.73 ไร่ เหลือเพียง 3.41 ไร่ มีทั้งการทำลายถิ่นที่อยู่อาศัยทางตรงและทางอ้อม เช่น การเก็บหัวจำหน่ายเป็นพืชประดับหรือนำไปสกัดไปเป็นวัตถุดิบในการทำเครื่องสำอาง และการขุดลอกแม่น้ำลำคลองโดยเฉพาะคลองที่มีพลับพลึงธาร (สมศักดิ์, 2556) การขุดลอกคลองและปรับแต่งตลิ่งอย่างต่อเนื่องมาตลอดเป็นผลทำให้เกิดกระแสน้ำไหลแรง เร็ว กัดเซาะให้ตลิ่งพัง จึงทำให้พลับพลึงธารลดจำนวนลงไปอย่างรวดเร็ว และเสี่ยงต่อการสูญพันธุ์ (ภาวินี, 2551)

ทั้งนี้พบว่า มีชุมชนท้องถิ่นหลายแห่งที่มีการอนุรักษ์และจัดการแห่งพลับพลึงธาร เช่น ในพื้นที่ หมู่ที่ 1 หมู่บ้านบางมัน เนื่องจากบ้านบางมัน มีสภาพเป็นเทือกเขาสลับซับซ้อน เป็นพื้นที่ป่าต้นน้ำลำธารที่มีความอุดมสมบูรณ์ และยังเป็นแหล่งที่พบพลับพลึงธาร และบ้านฝ่าย ท่าตั้งอยู่ในเขตรอยต่อป่าสงวนเขตอนุรักษ์พันธุ์สัตว์ป่าคลองนาคา เป็นพื้นที่ที่อุดมสมบูรณ์ด้วยทรัพยากรธรรมชาติมีความหลากหลายของระบบนิเวศทั้งพืชพรรณและสัตว์ป่าทั้งยังมีแหล่งน้ำสำคัญ และยังเป็นแหล่งที่พบพลับพลึงธารพันธุ์ไม้น้ำที่หายาก และหมู่ที่ 5 หมู่บ้านฝ่ายท่า ตำบลนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง คนในหมู่บ้านฝ่ายท่า ตระหนักและเห็นความสำคัญของทรัพยากรธรรมชาติในชุมชนมีการจัดตั้งกลุ่มต่างๆ มาพัฒนากระบวนการจัดการทรัพยากรธรรมชาติเพื่ออนุรักษ์และปกป้องโดยตลอด เช่น เกิดชมรมป่าสร้างฝัน กลุ่มฟ้าใหม่ใต้แสงหวัน ชมรมเพลินไพรศรีนาคา ถึงปัจจุบัน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการมีส่วนร่วมของประชาชนในทั้ง 2 หมู่บ้าน เกี่ยวกับการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร รวมทั้งศึกษาปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะ ในการมีส่วนร่วมอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ซึ่งผลการศึกษาจะทำให้ทราบระดับการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ปัญหาอุปสรรคและข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับการมีส่วนร่วมของประชาชน ในการอนุรักษ์แหล่งพลังพลึงธาร และเพื่อส่งเสริมและสนับสนุนในการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารในพื้นที่คลองนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

1.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การเลือกประชากร คัดเลือกโดยใช้หลักในการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยเลือกกลุ่มตัวอย่างจากประชาชนที่มีส่วนร่วมในการอนุรักษ์พลับพลึงธาร จำนวน 250 ครัวเรือน ได้แก่ หมู่ที่ 1 บ้านบางมัน จำนวน 164 ครัวเรือน และหมู่ที่ 5 บ้านฝ่ายท่า ตำบลนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง จำนวน 86 ครัวเรือน

1.2 การพัฒนาแบบสอบถาม

แบบสอบถามที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้ศึกษาวิจัยได้สร้างและดัดแปลงขึ้นโดยอาศัยแนวคิด ทฤษฎีและผลงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยผู้วิจัยได้ดัดแปลงข้อคำถามจากงานวิจัยของระวีวรรณ (2560) และลักขณาและคณะ (2561) ตลอดจนการเรียงลำดับของข้อคำถาม มีลักษณะเป็นคำถามปลายปิด และคำถามปลายเปิด ทำการทดสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหา (Content validity)โดยการหาดัชนีความสอดคล้อง (IOC) โดยผู้เชี่ยวชาญ ผลที่ได้คือ ค่า IOC=0.75 ซึ่งถือว่าเหมาะสม แล้วนำไปทดสอบ (Pre-test) กับบ้านไร่ใน ตำบลนาคาอำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง จำนวน 30 ครัวเรือน จากนั้นทดสอบความความน่าเชื่อถือ (reliability) ของเครื่องมือ โดยวิธี Cronbach’s alpha (กัลยา, 2555) กับคำถามด้านการมีส่วนร่วมได้ค่าความเชื่อมั่น เท่ากับ 0.787 ลักษณะของแบบสอบถามถูกสร้างขึ้นตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา ซึ่งมี 3 ตอน คือ ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ตอนที่ 2 การรับรู้ข้อมูลข่าวสารในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ตอนที่ 3 ระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ในหมู่บ้านบางมันและหมู่บ้านฝ่ายท่า ตอนที่ 4 ปัญหา อุปสรรค และตอนที่ 5 ข้อเสนอแนะของประชาชนในการมีส่วนร่วมของการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร คลองนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง

1.3 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

การสำรวจด้วยแบบสอบถาม ลงพื้นที่โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการส่งแบบสอบถามให้ตัวแทนครัวเรือนตอบเอง จำนวน 250 ชุด จากหมู่ที่ 1 บ้านบางมัน และหมู่ที่ 5 บ้านฝ่ายท่า ตำบลนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง

2. การวิเคราะห์ข้อมูล

ตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบสอบถามและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ แล้วนำเสนอผลการศึกษาด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ การแจกแจงความถี่ (Frequency) ค่าร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ในการวัดระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร เป็นลักษณะคำถามที่มีคำตอบให้เลือก 5 ระดับ ตามแบบ Likert’s scale (ชูศรี, 2553) กำหนดความหมาย ของระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร โดยแบ่งเป็นช่วงคะแนน ได้แก่ 1.00-1.80, 1.81-2.60, 2.61-.40, 3.41-4.20 และ 4.21-5.00 หมายถึง การมีส่วนร่วมน้อยที่สุดถึงมากที่สุดตามลำดับ

ผลและวิจารณ์ผล

1. ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง

บ้านบางมัน พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 59.1 มีอายุระหว่าง 40-49 ปี คิดเป็นร้อยละ 38.4 ส่วนใหญ่จบการศึกษาระดับประถมศึกษา คิดเป็นร้อยละ 31.7 และ ร้อยละ 82.3 ประกอบอาชีพทำการเกษตร/ทำสวน มีจำนวนสมาชิกในครัวเรือน 1-3 คน คิดเป็นร้อย 52.4 กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดเคยมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร และเคยเข้าร่วมกิจกรรมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารมากกว่า 5 ครั้งขึ้นไป คิดเป็นร้อยละ 67.1 กิจกรรมที่มีกลุ่มตัวอย่างเข้าร่วมมากที่สุดคือ ปลูกกล้าพลับพลึงธารในเขตอนุรักษ์พันธุ์สัตว์ป่าคลองนาคา คิดเป็นร้อยละ 21.7

บ้านฝ่ายท่า พบว่า มีผลการศึกษาคล้ายคลึงกับบ้านบางมัน กล่าวคือ กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 51.2 ส่วนใหญ่มีอายุระหว่าง 40-49 ปี คิดเป็นร้อยละ 31.4 แต่การศึกษา พบว่าส่วนใหญ่จบการศึกษาระดับอนุปริญญา/ปวส. คิดเป็นร้อยละ 25.6 และ มีจำนวนสมาชิกในครัวเรือน 4-6 คน คิดเป็นร้อยละ 64.0 ในกรณีการประกอบอาชีพ แม้นส่วนใหญ่จะประกอบอาชีพทำการเกษตร/ทำสวน แต่มีสัดส่วนเพียงร้อยละ 39.5 เท่านั้น ทั้งนี้เพราะกลุ่มตัวอย่างอื่นประกอบอาชีพรับจ้าง นอกจากนั้นยังพบว่า กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดมีการส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารและ เคยเข้าร่วมกิจกรรมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร 2 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 27.9 ส่วนใหญ่เป็นกิจกรรมปลูกกล้าพลับพลึงธารในเขตอนุรักษ์พันธุ์สัตว์ป่าคลองนาคา คิดเป็นร้อยละ 23.7 ทั้งนี้เนื่องจากในพื้นที่ดังกล่าวมีกิจกรรมการปลูกกล้า การขยายพันธุ์พลับพลึงธารที่ดำเนินการโดยกรมอุทยานแห่งชาติฯ และหน่วยงานในจังหวัดระนอง ร่วมกันจัดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

2. การรับรู้ข้อมูลข่าวสารในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร

บ้านบางมัน ด้านการรับรู้ข้อมูลข่าวสารในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมดเคยรับรู้ข่าวสารการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร คิดเป็นร้อยละ 100 โดยผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ได้รับข่าวสารจาก ผู้นำชุมชน คิดเป็นร้อยละ 43.3 และหมู่ที่ 5 บ้าน ฝ่ายท่า ตำบลนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง ด้านการรับรู้ข้อมูลข่าวสารในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมดเคยรับรู้ข่าวสารการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร คิดเป็นร้อยละ 100 ทั้งนี้เนื่องจากในพื้นที่บริเวณคลองนาคา ชุมชนได้ร่วมทำกิจกรรมกับโครงการต่างๆ ที่จัดขึ้นโดยภาครัฐและเอกชนในด้านการอนุรักษ์ การย้ายปลูกพลับพลึงธารอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ส่วนใหญ่ประชาชนในชุมชนได้รับข่าวสารครอบคลุมทุกครัวเรือน โดยผู้ตอบแบบสอบถาม ส่วนใหญ่ได้รับข่าวสารจากคือ ผู้นำชุมชน คิดเป็นร้อยละ 37.2

3. ระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร

ระดับการมีส่วนร่วมของกลุ่มตัวอย่างบ้านบางมัน และบ้านฝ่ายท่า รายละเอียดดัง Table 1 โดยระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร บ้านบางมัน มีค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ยรวม 3.97) พบว่า (1) การมีส่วนร่วมในการศึกษาการอนุรักษ์แหล่ง พลับพลึงธาร อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.05) (2) การมีส่วนร่วมในการวางแผนเรื่องการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.93) (3) การมีส่วนร่วมในการดำเนินการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.03) ซึ่งแกนนำในการอนุรักษ์พลับพลึงธารของชุมชนได้ให้ข้อมูลว่า ควรหลีกเลี่ยงกิจกรรมในพื้นที่คลองที่ส่งผลกระทบต่อพลับพลึงธารใน

อนาคตทุกกิจกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขุดคลองซึ่งทำให้กระแสน้ำมีความแรงมากขึ้น รวมถึงการลักลอบขุดหินและทรายไปขาย ทำให้หัวพลับพลึงธารถูกทำลาย โดยมีการจัดตั้งกลุ่มของชมรมเพลินไพรนาคาและกลุ่มเด็กรักษ์พลับพลึงธารเพื่อขับเคลื่อนการท่องเที่ยวเชิงการอนุรักษ์คลองนาคา (คุณชำนิ, สัมภาษณ์, 2561) (4) การมีส่วนในการติดตามและประเมินผลการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.0) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนิติญาและคณะ (2562) พบว่า การมีส่วนร่วมในการติดตามและประเมินผลในการอนุรักษ์พลับพลึงธาร บ้านคลองตาผุดและบ้านบางซอย อำเภอคุระบุรี จังหวัดพังงา อยู่ในระดับมาก (5) การได้รับผลประโยชน์จากการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.82) ซึ่งแกนนำในการอนุรักษ์พลับพลึงธารของชุมชนได้ให้ข้อมูลว่า การขยายพันธ์พลับพลึงธารมีความสำคัญต่อระบบนิเวศ เพราะพลับพลึงธารเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและวางไข่ของสัตว์น้ำหลายชนิด เช่น กุ้ง หอยโข่ง ปลาพลวง ปลากะโสม ฯลฯ ที่สำคัญพลับพลึงธารเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สร้างรายได้แก่คนในชุมชน (คุณนุกูล, สัมภาษณ์, 2561)

Table 1 Levels of participation in conservation of the water onion.

Participation in conservation of the water onion	Ban Bang Man			Ban Phai Tha		
	Mean	SD	Participation level	Mean	SD	Participation level
1. Participation in study the conservation of the water onion	4.05	0.55	High	3.91	0.71	High
2. Participation in the planning of the conservation of the water onion	3.93	0.65	High	3.77	0.84	High
3. Participation in the conservation of the water onion	4.03	0.56	High	3.99	0.75	High
4. Participation in monitoring and evaluating the conservation of the water onion	4.00	0.57	High	3.81	0.69	High
5. Participate in benefiting from the conservation of the water onion	3.82	0.85	High	3.64	0.92	High
Total average	3.97		High	3.82		High

ระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร หมู่ที่ 5 บ้านฝ่ายท่า ผลการศึกษาพบว่าประชาชนส่วนใหญ่มีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ยรวม 3.82) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ลักขณาและคณะ (2561) พบว่า ความคิดเห็นของประชากรตัวอย่างที่มีต่อการอนุรักษ์พลับพลึงธาร พบว่า อยู่ในระดับมาก มีคะแนนเฉลี่ย 3.78 คือ (1) การมีส่วนร่วมในการศึกษาการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.91) (2) การมีส่วนร่วมในการวางแผนเรื่องการอนุรักษ์ แหล่ง

พลับพลึงธาร อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.77) (3) การมีส่วนร่วมในการดำเนินการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.99) ทั้งนี้เนื่องจากมีหน่วยงานของจังหวัดระนอง การท่องเที่ยวและองค์การบริหารส่วนตำบลนาคาเข้ามามีส่วนร่วมทุกครั้ง จัดกิจกรรมทุกปีอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้พลับพลึงธารได้รับการดูแลและอนุรักษ์จากชาวบ้านมากขึ้น และร่วมกันทำให้คลองนาคาเป็นแหล่งที่มีพลับพลึงธารมากที่สุด (องค์การระหว่างประเทศเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ, 2551) (4) การมีส่วนในการติดตามและประเมินผลการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.81) (5) การได้รับผลประโยชน์จากการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.64)

4. ปัญหา อุปสรรค ในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารคลองนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง

ปัญหา อุปสรรค ของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ในกรณีบ้านบางมัน พบว่า อันดับที่ 1 ได้แก่ ไม่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากภาครัฐหรือการปกครองส่วนท้องถิ่น ร้อยละ 27.1 อันดับที่ 2 ได้แก่ ประชาชนขาดความรู้และความเข้าใจในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร มีค่าร้อยละ 21.1 อันดับที่ 3 ได้แก่ เจ้าหน้าที่ไม่ทุ่มเทและเสียสละในการทำงานอย่างจริงจัง มีค่าร้อยละ 18.0 อันดับที่ 4 ได้แก่ ประชาชนในพื้นที่ไม่ค่อยสนใจในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร มีค่าร้อยละ 13.4 อันดับที่ 5 ได้แก่ ไม่ทราบเป้าหมายของการเข้าร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร มีค่าร้อยละ 12.3 อันดับที่ 6 ได้แก่ ไม่มีการประสานงานระหว่างหน่วยงานกับผู้นำชุมชนเกี่ยวกับการอนุรักษ์พลับพลึงธาร มีค่าร้อยละ 8.1 โดยภาพรวมปัญหา อุปสรรคในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารมากที่สุด ได้แก่ ไม่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากภาครัฐหรือการปกครองส่วนท้องถิ่น ขาดการสนับสนุนงบประมาณในการฟื้นฟู และอนุรักษ์พลับพลึงธาร หน่ายงานภาครัฐหรือเอกชนที่เกี่ยวข้องกับการจัดการพลับพลึงธารควรส่งเสริมกิจกรรมและสนับสนุนงบประมาณอย่างต่อเนื่อง

ปัญหา อุปสรรค ของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร พบว่า บ้านฝ่ายท่า ได้แก่ อันดับที่ 1 ได้แก่ ประชาชนขาดความรู้และความเข้าใจในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร มีค่าร้อยละ 30.0 อันดับที่ 2 ได้แก่ ไม่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากภาครัฐหรือการปกครองส่วนท้องถิ่น มีค่าร้อยละ 22.6 อันดับที่ 3 ได้แก่ ประชาชนในพื้นที่ไม่ค่อยสนใจในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร มีค่าร้อยละ 19.4 อันดับที่ 4 ได้แก่ ไม่มีการประสานงานระหว่างหน่วยงานกับผู้นำชุมชนเกี่ยวกับการอนุรักษ์พลับพลึงธาร มีค่าร้อยละ 14.7 อันดับที่ 5 ได้แก่ เจ้าหน้าที่ไม่ทุ่มเทและเสียสละในการทำงานอย่างจริงจัง มีค่าร้อยละ 10.1 อันดับที่ 6 ได้แก่ ไม่ทราบเป้าหมายของการเข้าร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร มีค่าร้อยละ 3.2 ปัญหา อุปสรรคในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารมากที่สุด ได้แก่ ประชาชนขาดความรู้และความเข้าใจในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ควรจัดทำสื่อความรู้เผยแพร่และจัดทำการเรียนรู้เรื่องการอนุรักษ์พลับพลึงธาร สอดคล้องกับงานวิจัยของ ลักขณาและคณะ (2561) ได้ศึกษาวิจัย ปัจจัยที่มีผลต่อการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์พลับพลึงธาร (*Crium thaiamui* J. Schulze) บริเวณตำบลนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง ผลการศึกษาพบว่า ควรมีการถ่ายทอดองค์ความรู้ในการอนุรักษ์พลับพลึงธาร และสร้างแรงจูงใจให้ชาวบ้านได้มีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์จากพลับพลึงธารอย่างยั่งยืน และงานวิจัยของอรัญยาและคณะ (2560) พบว่าประชาชนในชุมชนส่วนใหญ่ยังขาดความรู้ในด้านการจัดการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของสุถี (2557) พบว่า คนในชุมชนขาดความรู้ความเข้าใจในเรื่องการอนุรักษ์อย่างถูกต้องเพราะเนื่องจากชาวบ้านส่วนมากเรียนจบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจะมีแค่

คนบางกลุ่มเท่านั้นที่เข้าใจวัตถุประสงค์ของการอนุรักษ์ทรัพยากรทางธรรมชาติของชุมชน ในการอนุรักษ์หากจะทำให้คนในชุมชนมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์มากขึ้นจะต้องมีการจัดอบรมให้ความรู้อย่างถูกต้องเพื่อให้คนในชุมชนรู้สึกหวงแหน นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของนิติญาและคณะ (2562) ปัญหา อุปสรรคของประชาชนที่เกิดขึ้นต่อการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารคลองตาผุดและคลองบ้านบางซอย อำเภอคุระบุรี จังหวัดพังงา พบว่า ประชาชนยังขาดความรู้ความเข้าใจบางส่วนในอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร และยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของสุชาวลี (2555) ได้ศึกษาวิจัย การมีส่วนร่วมของประชาชนในการจัดการป่าชุมชน กรณีศึกษา ตำบลวังมะปราง อำเภอ วังวิเศษ จังหวัดตรัง ผลการศึกษาพบว่า หน่วยงานภาครัฐไม่มีนโยบายที่ส่งเสริมและสนับสนุนการมีส่วนร่วมในการจัดการป่าชุมชนอย่างจริงจัง

5. ข้อเสนอแนะของประชาชนต่อการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร

หมู่ที่ 1 บ้านบางมัน อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง พบว่า ต้องการสนับสนุนงบประมาณในการฟื้นฟูและอนุรักษ์พลับพลึงธารอย่างต่อเนื่อง ต้องการให้เจ้าหน้าที่หรือองค์กรที่มีความรู้ด้านพลับพลึงธารมาให้ความรู้แก่ประชาชน ต้องการความร่วมมือประสานงาน หัวหน้ากลุ่มหรือผู้นำชุมชน รณรงค์ให้ชุมชนมีจิตสำนึกรักษาทรัพยากรของท้องถิ่นตัวเอง และต้องการให้มีการประชาสัมพันธ์ระหว่างหน่วยงานกับประธานได้รับทราบอย่างแท้จริงและจริงจัง และต้องการให้หน่วยงานทุกภาคส่วน ตระหนักถึงความสำคัญของพลับพลึงธารและให้ความร่วมมืออย่างจริงจัง รวมทั้งด้านระบบนิเวศสมควรที่จะต้องศึกษาให้เข้าใจก่อนที่จะดำเนินการปลูกอนุรักษ์ ฟื้นฟูพลับพลึงธาร เช่น ฤดูการปลูก การเพาะเมล็ด ฤดูการเก็บเมล็ด

หมู่ที่ 5 บ้านฝ่ายท่า ตำบลนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง พบว่า องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น ควรบูรณาการแผนการอนุรักษ์พลับพลึงธารเข้าสู่ท้องถิ่น จัดงบสนับสนุนต่อเนื่องทุกปี ควรจัดทำสื่อความรู้เผยแพร่และจัดทำการเรียนรู้เรื่องการอนุรักษ์พลับพลึงธารในโรงเรียน เพื่อให้นักเรียนมีความตระหนักในการอนุรักษ์ยิ่งขึ้น ด้านความร่วมมือ ต้องการให้มีการติดตามผลอย่างต่อเนื่อง ควรจัดแผนบูรณาการทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์พลับพลึงธาร และต้องการให้มีการอนุรักษ์พลับพลึงธารเพื่อให้ผู้คนรู้จักมากยิ่งขึ้นและให้ภาครัฐ ผู้นำท้องถิ่นควรให้ความสำคัญกับพลับพลึงธารให้มากกว่าเดิม และต้องการส่งเสริมให้เป็นสถานที่ท่องเที่ยว

สรุป

การมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์พลับพลึงธารของทั้งสองหมู่บ้านโดยภาพรวมอยู่ในระดับมาก ปัญหาอุปสรรคที่สำคัญ คือ ไม่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากภาครัฐหรือการปกครองส่วนท้องถิ่นและประชาชนขาดความรู้และความเข้าใจในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ข้อเสนอแนะของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารของทั้ง 2 หมู่บ้าน คือ ต้องการสนับสนุนงบประมาณในการฟื้นฟูอย่างต่อเนื่อง จัดทำสื่อเผยแพร่ และให้ผู้นำชุมชนมีการติดตามผลอย่างต่อเนื่อง

จากการศึกษาในภาพรวม พบว่า การรับรู้ข้อมูลข่าวสารในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร ส่วนใหญ่เคยรับรู้ข่าวสารการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารและได้รับข่าวสารจากผู้นำชุมชน ระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร หมู่ที่ 1 บ้านบางมัน อยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ย 3.97 และหมู่ที่ 5 บ้านฝ่ายท่า อยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ย 3.82 สำหรับปัญหาและอุปสรรคที่พบมากที่สุดในหมู่ที่ 1 บ้านบางมัน คือ ไม่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากภาครัฐหรือการปกครองส่วนท้องถิ่น มีค่าร้อยละ 27.1 และหมู่ที่ 5 บ้านฝ่ายท่า คือ ประชาชนขาดความรู้และความเข้าใจในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร มีค่าร้อยละ 30.0 ส่วนข้อเสนอแนะของประชาชน

ต่อการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธาร หมู่ที่ 1 บ้านบางมัน ต้องการสนับสนุนงบประมาณในการฟื้นฟู และอนุรักษ์พลับพลึงธารอย่างต่อเนื่อง และหมู่ที่ 5 บ้านฝ่ายท่า ต้องการให้องค์การปกครองส่วนท้องถิ่นบูรณาการแผนการอนุรักษ์พลับพลึงธารเข้าสู่ท้องถิ่นและจัดงบสนับสนุนต่อเนื่องทุกปี

ข้อเสนอแนะ ควรส่งเสริมและสนับสนุนกิจกรรมของชุมชนเพื่อให้มีการอนุรักษ์และฟื้นฟูพลับพลึงธาร เช่น การสนับสนุนงบประมาณอย่างต่อเนื่อง การผลิตกล้าคุณภาพเพื่อการฟื้นฟู และการให้ความรู้ด้านการอนุรักษ์และการฟื้นฟูพลับพลึงธารอย่างต่อเนื่อง ควรส่งเสริมให้พื้นที่ที่พบการกระจายพันธุ์พลับพลึงธารเป็นแหล่งการเรียนรู้ของเยาวชนและประชาชนทั่วไป และหน่วยงานภาครัฐ เอกชนและองค์กรการพัฒนาเอกชนที่เกี่ยวข้องให้ความสำคัญในฟื้นฟูและการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารอย่างจริงจัง

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมของพลับพลึงธาร และคุณสมบัติทางเคมี ต่อการนำไปเป็นสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ที่มีคุณค่าทางเภสัชกรรม
2. ควรศึกษาขยายพันธุ์พลับพลึงธารโดยวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ โดยใช้ส่วนประกอบต่างๆ ของพลับพลึงธารในวุ้นอาหารสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน เพื่อการผลิตต้นกล้าที่มีคุณภาพ
3. ควรอนุรักษ์และฟื้นฟูพลับพลึงธาร โดยการย้ายปลูก เทคนิคการปลูกแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและติดตามการเจริญเติบโตพลับพลึงธารในพื้นที่และนอกพื้นที่ถิ่นอาศัย
4. ควรติดตามการเปลี่ยนแปลงของการเจริญเติบโตหลังการย้ายปลูกของพลับพลึงธาร โดยประยุกต์ใช้นวัตกรรมเทคโนโลยีสารสนเทศและการถ่ายทอดชุดความรู้สู่ชุมชน

เอกสารอ้างอิง

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช. 2560. **พลับพลึงธาร**: Crinum thaianum J. Schulze **พรรณไม้น้ำถิ่นเดียวในประเทศไทยที่ใกล้สูญพันธุ์**. ม.ป.ท.: กลุ่มงานวิจัยพันธุ์พืชป่ามีค่า หายาก และใกล้สูญพันธุ์, กองคุ้มครองพันธุ์สัตว์ป่าและพืชป่าตามอนุสัญญา, กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2555. **การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล**. พิมพ์ครั้งที่ 20. ธรรมสาร, กรุงเทพฯ.

ชูศรี วงศ์รัตนะ. 2553. **เทคนิคการใช้สถิติเพื่อการวิจัย**. พิมพลักษณ์ กรุงเทพฯ : คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, พิมพ์ครั้งที่ 12. จำนวน 382 หน้า.

นิติญา สังขนันท์ ธิดารัตน์ คำล้อม และระวีวรรณ โต๊ะหยอ. 2562. **การมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารกรณีศึกษา** : **คลองตาผุด และคลองบ้านบางซอย ตำบลคุระ อำเภอคุระบุรี จังหวัดระนอง**. ม.ป.ท.: ม.ป.พ.

ภาวินี อินเทพ. 2551. “คลองนาคาใสไหลเย็น แลเห็นพลับพลึงธาร”. **เนชั่น สุดสัปดาห์.** 17(863): 50-51.

ระวีวรรณ โต๊ะหยอ. 2560. **การมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์แหล่งพลับพลึงธารกรณีศึกษา** : **คลองตาผุด และคลองบ้านบางซอย ตำบลคุระ อำเภอคุระบุรี จังหวัดระนอง**. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต.

สักขณา แสงอุไรเพ็ญ, สมนิมิต พุกงาม และปิยพงษ์ ทองดีนอก. 2561. ปัจจัยที่มีผลต่อการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์พลับพลึงธาร (*Crium thaiamui* J. Schulze) บริเวณตำบลนาคา อำเภอสุขสำราญ จังหวัดระนอง. **วารสารวนศาสตร์** 37 (1) : 132 – 142

สมศักดิ์ สุนทรนวภัทร. 2556. **พลับพลึงธาร; พืชหนึ่งเดียวในโลกที่ใกล้จะสูญพันธ์** โครงการอนุรักษ์พลับพลึงธารเครือข่ายอนุรักษ์ลุ่มน้ำอันดามันตอนบน. กรุงเทพฯ.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2559.**วารสาร ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม**.

สุชาวลี ชูเอน. 2555. การมีส่วนร่วมของประชาชนในการจัดการป่าชุมชน กรณีศึกษา ตำบลวังมะปราง อำเภอวังวิเศษ จังหวัดตรัง. **วารสารวิทยบริการ** 23 (3): 44-53.

สุถี เสริฐศรี. 2557. **แนวทางการจัดการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืนในชุมชนคลองโคน อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม**. ศิลปศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมการบริการและการท่องเที่ยว, มหาวิทยาลัยกรุงเทพ.

องค์การระหว่างประเทศเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ. 2551. **พลับพลึงธาร หนึ่งเดียวในโลก. (แผ่นพับประชาสัมพันธ์).** องค์การระหว่างประเทศเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ, กรุงเทพฯ.

อรัญยา ปฐมสกุล วิศาล ศรีมหาวโร และสมคิด รัตนพันธุ์. 2560. **การพัฒนาการท่องเที่ยวเชิงนิเวศของชุมชน: กรณีศึกษาตำบลท่าชนะ อำเภอท่าชนะ จังหวัดสุราษฎร์ธานี**. มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี, สุราษฎร์ธานี.

คุณชำนิ อุ่นขาว. สัมภาษณ์ 12 พฤศจิกายน 2561

คุณนุกูล ทองสุย. สัมภาษณ์ 12 พฤศจิกายน 2561

บทบาทและความพร้อมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อการทำหน้าที่คณะกรรมการป่าชุมชนระดับจังหวัด: กรณีศึกษาจังหวัดสุราษฎร์ธานี

Roles and Readiness of Stakeholders to Perform the Provincial Community Forest Committee: Case Study of Surat Thani Province

พงศ์นรินทร์ ไชยกรด[1*] สุรินทร์ อ้นพรม[2] และ รัชนี โพธิแท่น[2]

Phongnarin Chaikrod[1*], Surin Onprom[2] and Rachanee Pothitan[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการบริหารจัดการป่าชุมชนระดับจังหวัด กรณีศึกษาจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยวิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก 4 กลุ่ม จำนวน 11 ราย และสัมภาษณ์ผู้แทนป่าชุมชน จำนวน 97 ราย พบว่า จังหวัดสุราษฎร์ธานีมีป่าชุมชนที่ขึ้นทะเบียนกับกรมป่าไม้รวมทั้งสิ้น 128 แห่ง เนื้อที่รวม 34,640 ไร่ ส่วนใหญ่เป็นป่าชุมชนขนาดเล็กกว่า 100 ไร่ การจัดตั้งป่าชุมชนเน้นการอนุรักษ์และป้องกันพื้นที่ มีการใช้ประโยชน์ทางอ้อมเป็นหลัก การบริหารจัดการป่าชุมชนระดับจังหวัด พบว่า มีผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย 4 กลุ่ม ได้แก่ หน่วยของงานรัฐ สถาบันการศึกษา องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และภาคเอกชน มีบทบาทและความสำคัญต่อการบริหารจัดการป่าชุมชนแตกต่างกัน ประกอบด้วย การวางแผนเชิงนโยบาย การติดตามประเมินผล การสร้างความตระหนัก และการประชาสัมพันธ์ นอกจากนี้ ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับกฎหมายป่าชุมชน คิดเป็นร้อยละ 66.3

ABSTRACT

This study aimed to study analyze stakeholders in community forest governance of Surat Thani province. Data was collected by in-depth interview four groups of 11 stakeholders together with questionnaire interview 97 representatives of community forests in Surat Thani province. The study found that, in the study area, 128 community forests were registered with Royal Forest Department. Total forest area was 34,640 rai. Majority area size was relatively small at less than 100 rai. The management objective was focusing on conservation and protection of forest resources. The utilization was mainly indirect use. Regarding community forest governance at provincial level, four group of stakeholders were identified including government, institutions, local government and private sector. Each group of stakeholder would have different important level and function in community forest governance. These functions were policy planning, monitoring and assessment, promoting awareness and public relations. In addition, the study found that stakeholders have 66.3 percentage of knowledge relevant to the current community forestry act.

Key words: community forest, provincial community forest committee, stakeholder, role, management

[*] Corresponding author; e-mail address: **ahsawin32@gmail.com**

[1]สาขาการบริหารทรัพยากรป่าไม้และสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Master Program of Forest Resource and Environmental Administration, Graduate School, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Forest Management, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ป่าชุมชนเป็นยุทธศาสตร์หนึ่งของรัฐในการแก้ไขปัญหาความเสื่อมโทรมของทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมโดยกรมป่าไม้ซึ่งเป็นหน่วยงานหลักในการดูแลรักษาทรัพยากรป่าไม้ได้ริเริ่มและพัฒนาโครงการป่าชุมชนมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 โดยเน้นกระบวนการสร้างการมีส่วนร่วมของประชาชนและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียให้เข้ามาร่วมมือกันดูแลพื้นที่ป่าที่อยู่ติดกับชุมชน พบว่า ในปี พ.ศ. 2561 กรมป่าไม้ได้ดำเนินการจัดตั้งป่าชุมชนรวมทั้งสิ้น 12,248 หมู่บ้าน มีพื้นที่ป่าทั้งหมด 6,340,799 ไร่ (กรมป่าไม้, 2561) ทั้งนี้ ชุมชนท้องถิ่นซึ่งเป็นผู้ดูแลและบริหารจัดการพื้นที่ป่าดังกล่าวสามารถนำทรัพยากรมาใช้ประโยชน์หลากหลายด้านทั้งทางเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อมของชุมชนเอง อีกทั้ง ยังช่วยเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้กับประเทศอีกด้วย

ในปี พ.ศ. 2562 รัฐบาลได้ออกพระราชบัญญัติป่าชุมชนเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการป่าของชุมชน และเพื่อให้การบริหารจัดการป่าชุมชนมีความชัดเจนขึ้น รวมถึงการรองรับสิทธิของชุมชนในการเข้าถึงและใช้ประโยชน์ทรัพยากรในป่าชุมชนให้ถูกต้องตามกฎหมาย โดยกำหนดกลไกการบริหารจัดการป่าชุมชนโดยแบ่งคณะกรรมการออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ คณะกรรมการนโยบายป่าชุมชน คณะกรรมการป่าชุมชนระดับจังหวัด และคณะกรรมการจัดการป่าชุมชน ซึ่งแต่ละระดับมีบทบาท หน้าที่ และความสำคัญที่แตกต่างกัน (ราชกิจจานุเบกษา, 2562) ทั้งนี้คณะกรรมการป่าชุมชนประจำจังหวัดมีบทบาทและความสำคัญอย่างยิ่งเกี่ยวกับการบริหารจัดการป่าชุมชนในระดับจังหวัด โดยองค์ประกอบของคณะกรรมการป่าชุมชน ประกอบด้วยผู้มีส่วนได้ส่วนได้ส่วนเสียจากหลายภาคส่วนทั้งภาคประชาชน หน่วยงานภาครัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และสถาบันวิชาการ มีหน้าที่ในการพิจารณาเกี่ยวกับการบริหารจัดการรวมถึงการติดตามประเมินผลของป่าชุมชนในระดับจังหวัด

จังหวัดสุราษฎร์ธานีเป็นจังหวัดทางภาคใต้ของประเทศไทย แบ่งการปกครองเป็น 19 อำเภอ 131 ตำบล 1,074 หมู่บ้าน (สำนักงานจังหวัดสุราษฎร์ธานี, 2561) ในจังหวัดสุราษฎร์ธานีมีการดำเนินการโครงการป่าชุมชนทั้งหมด 128 หมู่บ้าน รวมเนื้อที่ 38,903-2-8 ไร่ (กรมป่าไม้, 2561) ซึ่งครบคลุมทุกอำเภอในจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการบริหารจัดการป่าชุมชนระดับจังหวัด เพื่อนำเป็นไปแนวทางในการบริหารจัดการป่าชุมชนในจังหวัดสุราษฎร์ธานีต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยนี้รวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรก ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ 1) หน่วยงานรัฐ ประกอบด้วย ผู้ว่าราชการจังหวัด สำนักจัดการทรัพยากรป่าไม้ที่ 11 (สุราษฎร์ธานี) สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม อัยการจังหวัด และกองอำนวยการรักษาความมั่นคงภายในราชอาณาจักร 2) สถาบันการศึกษา ประกอบด้วย มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานีและมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี 3) องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ประกอบด้วย องค์การบริหารส่วนจังหวัด และ 4) ภาคเอกชน ประกอบด้วย ประธานเครือข่ายป่าชุมชน บริษัท เมโทร เอ็ม ดี เอฟ จำกัด (สุราษฎร์ธานี) และชุมชน รวม 11 ราย ตามองค์ประกอบคณะกรรมการป่าชุมชนระดับจังหวัดของพระราชบัญญัติป่าชุมชน พ.ศ. 2562 รวบรวมข้อมูลโดยการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้รับผิดชอบงานด้านป่าชุมชนของแต่ละหน่วยงาน กลุ่มที่สอง ได้แก่ ป่าชุมชนที่ขึ้นทะเบียนกับกรมป่าไม้ในจังหวัดสุราษฎร์ธานี จำนวน 128 หมู่บ้าน (กรมป่าไม้, 2561) กำหนดขนาดตัวอย่างตามสูตรของ Krejcie and Morgan (1970) ได้ขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม เท่ากับ 97 ราย สุ่มตัวอย่างโดยวิธีการจับฉลากตามรายชื่อป่าชุมชนกระจายกลุ่มตัวอย่างตามผลการประเมินการจัดการป่าชุมชนของกรมป่าไม้ รายละเอียดแสดงใน Table 1 รวบรวมข้อมูลโดยการสัมภาษณ์ตัวแทนของป่าชุมชน ได้แก่ คณะกรรมการป่าชุมชน ป่าชุมชนละ 1 ราย และนำมาวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเชิงพรรณา ประกอบด้วย ค่าความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และในการให้ค่าคะแนนเป็นการเรียงลำดับ และนำ

ลำดับมาคำนวนกับค่าถ่วงน้ำหนัก เพื่อหาค่าคะแนนสูงสุด โดยเป้าหมายและวัตถุประสงค์ในการจัดตั้งป่าชุมชน มีค่าคะแนนเต็ม 3 คะแนน และค่าความสำคัญของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียระดับจังหวัด คะแนนเต็ม 11 คะแนน

Table 1 Distribution of sample size in each community forest management performance.

Categories of community forests performance	Number of community forests (village)	Sample size (village)
Excellence	8	6
Good	40	30
Poor	46	35
Very poor	34	26
Total	128	97

ผลและวิจารณ์ผล

ข้อมูลทั่วไปของป่าชุมชนในจังหวัดสุราษฎร์ธานี

จากการศึกษา พบว่า ป่าชุมชนที่ได้ขึ้นทะเบียนกรมป่าไม้ทั้งสิ้น 128 หมู่บ้าน แบ่งเป็นป่าชุมชนที่มีอายุโครงการอยู่ 40 หมู่บ้าน คิดเป็นร้อยละ 31.25 และป่าชุมชนที่หมดอายุโครงการแล้ว 88 หมู่บ้าน คิดเป็นร้อยละ 68.75 เนื้อที่รวมของพื้นที่ป่าชุมชน เท่ากับ 34,640-2-22 ไร่ เนื้อที่เฉลี่ย 270-2-52 ไร่ ทั้งนี้ ป่าชุมชนในจังหวัดสุราษฎร์ธานีส่วนใหญ่ ร้อยละ 49.22 เป็นป่าชุมชนที่มีขนาดไม่เกิน 100 ไร่ รองลงมา คือป่าชุมชนที่มีขนาด 101-500 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 32.03 (Table 2) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาพื้นที่ป่าชุมชนที่เหมาะสมในภาคใต้ควรมีขนาด 21-100 ไร่ เนื่องจากลักษณะทางภูมิศาสตร์ของภาคใต้ เป็นป่าที่มีลักษณะเป็นหย่อมเล็กๆ ทำให้ขนาดพื้นที่ป่าชุมชนมีขนาดเล็ก อีกทั้งจำนวนประชากรในชุมชนมีจำนวนน้อย ทำให้การรักษาดูแลพื้นที่ขนาด 21-100 ไร่ เป็นขนาดที่เหมาะสมที่ชุมชนสามารถจัดการได้ (สัมพันธ์และคณะ, 2548)

Table 2 Number of community forests in Surat Thani province categorized by forest area.

Community forests area (Rai)	Number of community forests (village)	%
< 100	63	49.22
101-500	41	32.03
501-1000	15	11.72
1001-1500	5	3.91
1501-2000	2	1.56
> 2000	2	1.56
Total	128	100

การจัดตั้งป่าชุมชนมีการดำเนินการในพื้นที่ต่างๆ โดยอยู่ในพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 57.51 รองลงมาเป็นพื้นที่ป่าตามพระราชบัญญัติป่าไม้ คิดเป็นร้อยละ 22.93 เขตปฏิรูปที่ดินเพื่อเกษตรกรรม คิดเป็นร้อยละ 13.66 พื้นที่ตามหนังสือสำคัญสำหรับที่หลวง คิดเป็นร้อยละ 3.78 และเขตนิคมสหกรณ์ คิดเป็นร้อยละ 2.11 จากผลดังกล่าวมีป่าชุมชนถึงร้อยละ 19.55 ที่อยู่ในพื้นที่นอกกฎหมายป่าไม้ ซึ่งไม่สามารถใช้กฎหมายป่าไม้ในการบริหารจัดการได้ เพราะแต่ละพื้นที่มีกฎหมายเฉพาะ ทำให้การบริหารจัดการป่าชุมชนตามแนวทางของกรมป่าไม้บางกิจกรรมไม่สามารถดำเนินการได้ ทั้งนี้ พื้นที่ป่าชุมชนตั้งอยู่ในพื้นที่ป่าดิบชื้นมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 73.37 รองลงมาเป็นพื้นที่ที่อยู่นอกพื้นที่ป่า คิดเป็นร้อยละ 19.45 ตามมาด้วยพื้นที่ป่าชายเลน ป่าบึงน้ำจืด ป่าชายหาด ป่าฟื้นฟูตามธรรมชาติ และป่าพรุ โดยคิดเป็นร้อยละ 3.73, 1.31, 1.05, 0.64 และ 0.45 ตามลำดับ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามีการดำเนินการในพื้นที่ที่อยู่นอกพื้นที่ป่า ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่สีเขียวตามนโยบายของรัฐบาลและแสดงให้เห็นว่าการจัดการป่าในรูปแบบของป่าชุมชนสามารถเพิ่มพื้นที่ป่าได้

ทางด้านเป้าหมายและการบริหารจัดการป่าชุมชน โดยมีคะแนนเต็ม เท่ากับ 3 คะแนน พบว่า วัตถุประสงค์หลักในการจัดตั้งป่าชุมชนในจังหวัดสุราษฎร์ธานี 3 ลำดับแรกที่มีค่าคะแนนสูงสุด คือ เพื่อป้องกันการบุกรุกและแผ้วถางพื้นที่ป่าในชุมชน (1.52 คะแนน) เพื่อเก็บรักษาพื้นที่ป่าให้กับคนรุ่นหลัง (1.11 คะแนน) และเพื่ออนุรักษ์พื้นที่ป่าให้เป็นแหล่งใช้ประโยชน์ของชุมชน (1.07 คะแนน) ส่วนการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ป่าชุมชนที่สำคัญ 3 ลำดับแรก คือ เป็นแหล่งกักเก็บน้ำและเพิ่มความสมบูรณ์ของแหล่งน้ำ (1.52 คะแนน) เป็นแหล่งผลิตอาหารให้แก่ชุมชน (1.18 คะแนน) และเป็นที่พักผ่อนหย่อนใจ (1.13 คะแนน) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการใช้ประโยชน์ของป่าชุมชนในภาคใต้ ที่เน้นการใช้ประโยชน์ด้านแหล่งน้ำเป็นหลัก (พจนีย์และคณะ, 2550) และป่าชุมชนที่เหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์เป็นป่าต้นน้ำลำธาร ควรมีขนาด 21-50 ไร่ (สัมพันธ์และคณะ, 2548) ซึ่งป่าชุมชนในจังหวัดสุราษฎร์ธานีมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการบริหารจัดการสำหรับการใช้ประโยชน์ดังกล่าว

องค์ประกอบและบทบาทของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียของคณะกรรมการป่าชุมชนระดับจังหวัด

ทางด้านบทบาทและความเกี่ยวข้องของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการบริหารจัดการป่าชุมชนระดับจังหวัด พบว่า หน่วยงานของรัฐ มีบทบาทในการกำหนดนโยบาย แผนงาน ในการบริหารจัดการป่าชุมชนในระดับจังหวัด อนุมัติหรืออนุญาตในการใช้พื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งเป็นป่าชุมชน สนับสนุนงบประมาณในการบริหารจัดการป่าชุมชน และไกล่เกลี่ยข้อพิพาท หาข้อตกลงร่วมกันเมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับการจัดการป่าชุมชน สถาบันการศึกษามีบทบาทในการรวบรวมข้อมูลต่างๆ ของป่าชุมชนและนำข้อมูลมาเผยแพร่แก่ผู้สนใจและประชาสัมพันธ์หรือเผยแพร่แผนงาน นโยบาย กิจกรรมต่างๆ ของป่าชุมชน องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น มีบทบาทในการสนับสนุนงบประมาณในการบริหารจัดการป่าชุมชน การติดตาม ประเมินผลในการบริหารจัดการป่าชุมชนและการกระตุ้นหรือสร้างแรงจูงใจในการบริหารจัดการป่าชุมชน และภาคประชาชน มีบทบาทในการรับผิดชอบในการบริหารจัดการป่าชุมชน สร้างเครือข่ายทั้งภายในชุมชนและระหว่างชุมชน และรวบรวมข้อมูลต่างๆของป่าชุมชนและนำข้อมูลมาเผยแพร่แก่ผู้สนใจ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียมีบทบาทหน้าที่แตกต่างกัน แต่สามารถสนับสนุนซึ่งกันและกัน เนื่องจาก แต่ละกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียมีบทบาทเฉพาะที่หน่วยงานอื่นไม่สามารถดำเนินการได้ จึงมีความจำเป็นในการร่วมกันในการบริหารจัดการป่าชุมชน (Table 3)

ระดับความสำคัญของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อบทบาทคณะกรรมการป่าชุมชนระดับจังหวัด

จากการศึกษาความสำคัญของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย โดยจำแนกการบริหารจัดการป่าชุมชนออกเป็น 4 ด้าน ได้แก่ ด้านการวางแผนเชิงนโยบาย ด้านการติดตามประเมินผล ด้านการสร้างความตระหนัก และด้านการ

ประชาสัมพันธ์ โดยค่าคะแนนแต่ละด้าน มีค่าคะแนนเต็ม 11 คะแนน พบว่า ด้านการวางแผนเชิงนโยบาย หน่วยงานที่มีคะแนนความสำคัญสูงสุด ได้แก่ สำนักจัดการทรัพยากรป่าไม้ที่ 11 (สุราษฎร์ธานี) (9.45 คะแนน) รองลงมาคือ ผู้ว่าราชการจังหวัดสุราษฎร์ธานี (8.18 คะแนน) และสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดสุราษฎร์ธานี (7.36 คะแนน) ด้านการติดตามประเมินผล หน่วยงานที่มีคะแนนความสำคัญสูงสุด ได้แก่ ผู้ว่าราชการจังหวัดสุราษฎร์ธานี (8.82 คะแนน) รองลงมาคือ สำนักจัดการทรัพยากรป่าไม้ที่ 11 (สุราษฎร์ธานี) (8.55 คะแนน) และสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดสุราษฎร์ธานี (6.82 คะแนน) ด้านการสร้างความตระหนัก หน่วยงานที่มีคะแนนความสำคัญสูงสุด ได้แก่ สำนักจัดการทรัพยากรป่าไม้ที่ 11 (สุราษฎร์ธานี) (8.55 คะแนน) รองลงมาคือ องค์การบริหารส่วนจังหวัดสุราษฎร์ธานี (7.19 คะแนน) และเครือข่ายป่าชุมชนจังหวัดสุราษฎร์ธานี (6.91 คะแนน) และด้านการประชาสัมพันธ์ หน่วยงานที่มีคะแนนความสำคัญสูงสุด ได้แก่ สำนักจัดการทรัพยากรป่าไม้ที่ 11 (สุราษฎร์ธานี) (8.28 คะแนน) รองลงมาคือ เครือข่ายป่าชุมชนจังหวัดสุราษฎร์ธานี (8.19 คะแนน) และชุมชน (7.46 คะแนน) (Table 4) จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเห็นว่า สำนักจัดการทรัพยากรป่าไม้ที่ 11 (สุราษฎร์ธานี) เป็นหน่วยงานหลักและรับผิดชอบงานด้านป่าชุมชนมาตั้งแต่ต้น จึงเหมาะสมในการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับป่าชุมชนในทุกด้าน แต่มีการเห็นต่างในด้านการติดตามประเมินผล เนื่องจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเห็นว่าการสั่งการหน่วยงานภายในจังหวัดเป็นอำนาจโดยตรงของผู้ว่าราชการจังหวัด อาจจะช่วยให้การดำเนินงานการติดตาม ตรวจสอบงานด้านป่าชุมชน เกิดความรวดเร็วยิ่งขึ้น

Table 3 Categories and functions of stakeholders on provincial community forest committee.

Stakeholders	Functions
Government organizations	1. Policy formulation, planning and community forest administration. 2. Approval or allowance for setting up community forests. 3. Provision of budget for community forest management. 4. Conflict management and resolution relevant to resource utilization in community forest areas.
Academic institutions	1. Compiling and dissemination of information to interested people. 2. Public relations and stakeholder engagement.
Local government	1. Provision of budget for community forest management. 2. Monitoring and evaluation of community forest performance. 3. Development of incentive mechanisms.
Private sector	1. Support the implementation of community forest management. 2. Establishment of community networks. 3. Compiling and dissemination of community forest information.

Table 4 Importance of stakeholders in Surat Thani province categorized by community forests functions.

Stakeholders	Functions of stakeholders / Importance level					
	Policy planning	Monitor and assessment	Promoting awareness	Public relations	Points	Ranking
1. Forest resource management office 11 (Surat Thani)G/	9.45	8.55	8.55	8.28	34.83	1
2. Surat Thani GovernorG/	8.18	8.82	6.37	6.37	29.73	2
3. Provincial Administration OrganizationL/	7.00	6.46	7.19	6.28	26.92	3
4. Provincial Office of Natural Resources and Environment G/	7.36	6.82	6.73	5.82	26.74	4
5. Community Forest NetworkP/	6.65	4.73	6.91	8.19	26.48	5
6. CommunityP/	5.82	4.28	6.08	7.46	23.64	6
7. Suratthani Rajabhat UniversityI/	2.10	1.74	5.32	5.64	14.80	7
8. Prince of Songkla University Surat Thani CampusI/	1.90	1.72	5.06	4.56	13.24	8
9. Provincial Chief Public Prosecutor Surat ThaniG/	2.37	6.64	2.27	1.36	12.64	9
10. METRO GROUP in Surat ThaniP/	2.63	2.18	3.45	4.37	12.63	10
11. Internal Security Operations Command Surat ThaniG/	3.54	4.82	2.28	1.82	12.45	11

G/ Government Organizations I/ Academic Institutions

L/ Local government P/ Private sector

ความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับกฎหมายป่าชุมชนของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

จากการศึกษาความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับกฎหมายป่าชุมชน พบว่า ค่าเฉลี่ยความรู้ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย คิดเป็นร้อยละ 66.3 โดยกลุ่มภาคประชาชนมีความรู้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 73.8 รองลงมาคือหน่วยงานของงานรัฐ หน่วยงานการศึกษา และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น คิดเป็นร้อยละ 68.6, 66 และ 56.6 ตามลำดับ เมื่อแบ่งเป็นหมวดพบว่า หมวดนิยามป่าชุมชน ภาคเอกชนมีความรู้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 83 รองลงมา คือ หน่วยงานของรัฐ สถาบันการศึกษา และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น คิดเป็นร้อยละ 80, 75 และ 50 ตามลำดับ หมวดการจัดตั้งป่าชุมชน พบว่า หน่วยงานรัฐมีความรู้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 75 รองลงมา คือ ภาคเอกชน องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และสถาบันการศึกษา คิดเป็นร้อยละ 58, 50 และ 38 ตามลำดับ เนื่องจาก สถาบันการศึกษา เป็นหน่วยงานที่เข้ามามีส่วนร่วมในการบริหารจัดการป่าชุมชนหลังจากจัดตั้งป่าชุมชน ทำให้ไม่รู้ขั้นตอนและวิธีการในการจัดตั้งป่าชุมชน หมวดหน้าที่ของคณะกรรมการป่าชุมชน พบว่า องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นมีความรู้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 100 รองลงมา คือ ภาคเอกชน หน่วยงานของรัฐ และสถาบันการศึกษา คิดเป็นร้อยละ 67, 65 และ 50 ตามลำดับ หมวดการใช้ประโยชน์ พบว่า ภาคเอกชนมีความรู้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 78 รองลงมา คือ สถาบันการศึกษา หน่วยงานของรัฐ และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น คิดเป็นร้อยละ 67, 53 และ 33 ตามลำดับ เนื่องจาก องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเป็นหน่วยงานในการพัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐานของชุมชนและต้องการใช้งบประมาณในการจัดการพื้นที่ จึงไม่ให้ความสำคัญกับข้อกฎหมายในการใช้ประโยชน์ป่าชุมชน และหมวดบทลงโทษ พบว่า หน่วยงานการศึกษามีความรู้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 100 รองลงมา คือ ภาคเอกชน หน่วยของงานรัฐ และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น คิดเป็นร้อยละ 83, 70 และ 50 ตามลำดับ (Figure 1) จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า กลุ่มภาคประชาชนมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับกฎหมายป่าชุมชน มากที่สุด เนื่องจากเป็นกลุ่มที่ต้องลงมือปฏิบัติและอยู่ในพื้นที่โดยตรง ทำให้เกิดความสนใจมากที่สุด และระดับความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับกฎหมายป่าชุมชน ของกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียมีความแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มเติมความรู้ ความเข้าใจ เพื่อให้ผู้มีส่วนไต่ส่วนเสียมีความรู้ที่เท่าเทียมกัน เข้าใจไปในทิศทางเดียวกัน เพื่อทำให้เกิดความพร้อมในการเข้าไปทำหน้าที่คณะกรรมการป่าชุมชนระดับจังหวัด

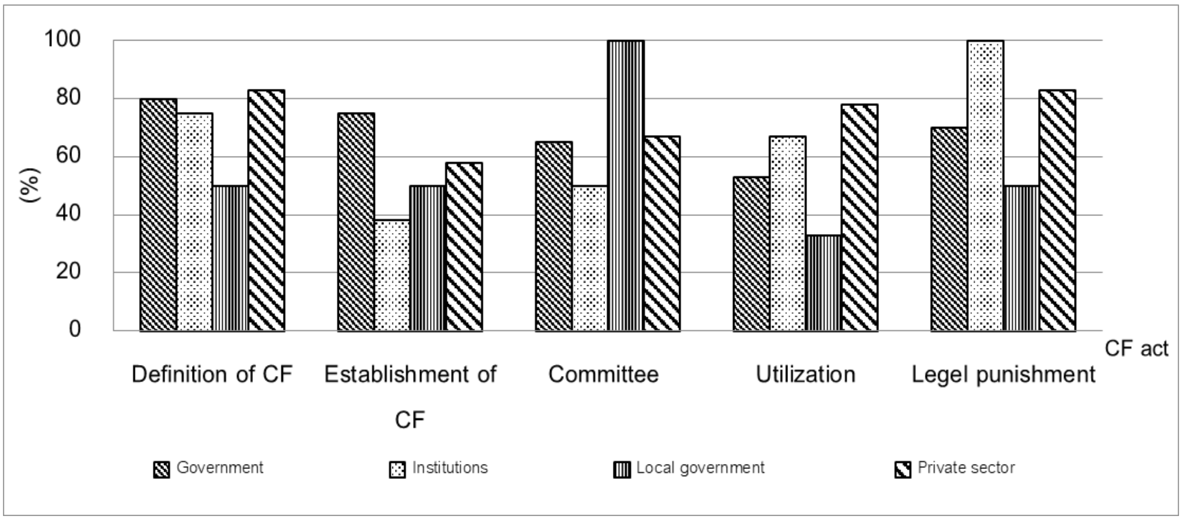


Figure 1 Understanding of stakeholders on the community forests act B.E. 2562.

สรุป

การจัดการป่าชุมชนในจังหวัดสุราษฎร์ธานี เน้นการจัดการป่าชุมชนแบบอนุรักษ์ มีการใช้ประโยชน์จากป่าชุมชนทางอ้อม จึงจำเป็นต้องมีผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากหลายภาคส่วน มาช่วยในการบริหารจัดการป่าชุมชนทั้ง 4 ด้าน ประกอบด้วย การวางแผนเชิงนโยบาย การติดตามประเมินผล การสร้างความตระหนัก และการประชาสัมพันธ์ ซึ่งแต่ละกลุ่มมีบทบาทและความพร้อมในการจัดการป่าชุมชนที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดหน้าที่ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการทำหน้าที่คณะกรรมการป่าชุมชนระดับจังหวัดให้ชัดเจน เพื่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจะได้ใช้ความสามารถอย่างเต็มศักยภาพ และเพิ่มเติมความรู้ในการบริหารจัดการป่าชุมชนและกฎหมายป่าชุมชนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการทำหน้าที่คณะกรรมการป่าชุมชนระดับจังหวัด รวมทั้งการคัดเลือกผู้มีความรู้และประสบการณ์ในการส่งเสริมการจัดการป่าชุมชนของแต่ละหน่วยงานในแต่ละกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เข้ามาทำหน้าที่คณะกรรมการป่าชุมชนระดับจังหวัด และอาจต้องศึกษากลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากหน่วยงานอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อครอบคลุมในการแสดงความเห็นและตัดสินใจร่วมกัน เพราะเป็นกลไกสำคัญของความสำเร็จในการบริหารจัดการป่าชุมชน

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ขอขอบพระคุณ ดร.สุรินทร์ อ้นพรม อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผศ.ดร.รัชนี โพธิแท่น อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะ และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่กรุณาให้ข้อมูลจนงานวิจัยลุล่วงสำเร็จไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมป่าไม้. 2561. **ผลการอนุมัติโครงการป่าชุมชน พ.ศ.2543 - ปัจจุบัน**. แหล่งที่มา: https://new.forest.go.th/community-extension, 17 ตุลาคม 2561.

พจนีย์ ไชยถาวร, ศุภมาศ เชาวะเจริญ และนพวรรณ จันทร์โสฬส. 2550. **การสำรวจและจัดเก็บข้อมูลอย่างมีส่วนร่วมเพื่อจัดทำฐานระบบข้อมูลป่าชุมชนในหมู่บ้านวนศาสตร์ชุมชนต้นแบบ กรณีศึกษา ป่าชุมชนบ้านถ้ำผึ้ง ตำบลต้นยวน อำเภอพนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี**. ศูนย์ศึกษาและพัฒนาวนศาสตร์ชุมชนที่ 15 (สุราษฎร์ธานี) สำนักจัดการป่าชุมชน กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

ราชกิจจานุเบกษา. 2562. ฉบับกฤษฎีกา เล่ม 136 ตอนที่ 71 ก, หน้า 71.

สมศักดิ์ สุขวงศ์. 2550. **การจัดการป่าชุมชน เพื่อคนและเพื่อป่า**. วีวัฒน์การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

สัมพันธ์ มีสิทธ์, สันติ สมเลข และภาสกร นาเวียงชัย. 2548. **การประเมินขนาดพื้นที่ป่าชุมชนที่เหมาะสมในการบริหารจัดการทรัพยากรป่าไม้ กรณีศึกษา โครงการป่าชุมชนที่กรมป่าไม้อนุมัติให้ดำเนินการ ตั้งแต่ ปี 2543-2547 ภาคใต้**. สำนักจัดการป่าชุมชน กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

สำนักงานจังหวัดสุราษฎร์ธานี. 2561. **บรรยายสรุปจังหวัดสุราษฎร์ธานี 2561.** สำนักงานจังหวัดสุราษฎร์ธานี, สุราษฎร์ธานี, สุราษฎร์ธานี.

Krejcie, R.V. and D.W. Morgan. 1970. **Determining Sample Size for Research Activities.** แหล่งที่มา: https://home.kku.ac.th/sompong/guest_speaker/handout.pdf, 5 พฤศจิกายน 2562.

การพัฒนาแนวทางการดำเนินงานสำหรับศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ

The Development of Implementation Guidelines for Forest Nursery Station of Bangkok

ธัญญาทิพย์ หมาดหมีน[1*] นิตยา เมี้ยนมิตร[1] และ พสุธา สุนทรห้าว[1]

Thanyatip Madmeen[1*], Nittaya Mianmit[1] and Pasuta Sunthornhao[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การดำเนินกิจกรรมของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ และเพื่อพัฒนาแนวทางการแจกจ่ายกล้าไม้อย่างมีส่วนร่วม เก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้างผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถามจากผู้มาขอรับบริการกล้าไม้จำนวน 287 ตัวอย่าง วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา และวิเคราะห์สภาพการณ์ภายนอกและภายในองค์กรด้วยการวิเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค (SWOT) ใช้เทคนิค Tows Matrix เพื่อพัฒนาแนวทางการดำเนินงานของศูนย์เพาะชำกล้าไม้อย่างมีส่วนร่วม ผลการศึกษา พบว่า ระดับความพึงพอใจในการให้บริการของหน่วยงานในการขอรับกล้าไม้ในภาพรวมของประชาชนอยู่ในระดับพึงพอใจมากที่สุด สำหรับแนวทางการดำเนินงานของศูนย์เพาะชำกล้าไม้มี 4 แนวทางประกอบด้วย คือ การส่งเสริมให้ประชาชนนำกล้าไม้จากศูนย์เพาะชำกล้าไม้ไปปลูกในพื้นที่ต่างๆ การใช้ความชำนาญในการปฏิบัติหน้าที่ให้สอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบัน การเพิ่มศักยภาพการประชาสัมพันธ์เกี่ยวกับการปลูกต้นไม้และสร้างความเข้าใจในการอนุรักษ์ทรัพยากรป่าไม้และสร้างเครือข่ายกับประชาชน

ABSTRACT

The objectives of this study were to analyze the operations of the Forest Nursery Station of Bangkok and to develop the guidelines for participation seedling distribution. The study was conducted by semi-structured interview with stakeholders and interviewing 287 samples. Data analysis of descriptive statistic and SWOT analysis. TOWS matrix was used for developing the guidelines for participatory implementation of Forest Nursery Station. The result revealed that the people' satisfaction level was at the highest level. There are 4 approaches for participatory implementation of Forest Nursery Station in Bangkok as follows 1) encourage people to plant seedlings from the nursery center in anywhere, 2) using the expertise to perform their duties in accordance with the current situation, 3) empowering public relations about planting trees, and 4) raising awareness on the conservation of forest resources and networking with people.

Key words: Seedling Distribution, satisfaction, Forest Nursery Station of Bangkok

* Corresponding author; e-mail address: queen_babeegang@hotmail.com

[1]สาขาวิชาการบริหารทรัพยากรป่าไม้และสิ่งแวดล้อม ภาคพิเศษ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Forest Resource and Environmental Administration, Faculty of Forestry Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทยมีพื้นที่ป่าไม้ ร้อยละ 31.68 ของพื้นที่ประเทศ (สำนักจัดการที่ดินป่าไม้, 2561) ในขณะที่นโยบายป่าไม้แห่งชาติ พ.ศ. 2528 ระบุไว้ว่าพื้นที่ป่าไม้ที่มีศักยภาพพอที่จะสามารถอำนวยประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควรมีพื้นที่เป็นร้อยละ 40 ของพื้นที่ประเทศหรือเท่ากับ 128.28 ล้านไร่ การที่จะสามารถบรรลุถึงเป้าหมายดังกล่าวรัฐจะต้องดำเนินการปลูกป่าเพิ่มอีกพร้อมกับรักษาป่าที่เหลืออยู่ไว้ให้ได้ โดยกำหนดให้เพิ่มและพัฒนาพื้นที่ป่าไม้ ทั้งป่าอนุรักษ์ ป่าเศรษฐกิจ และป่าชุมชน ให้ได้ตามเป้าหมายภายใต้กรอบเวลาที่กำหนดในแผนแม่บทพัฒนาการป่าไม้แห่งชาติ

แนวทางที่ใช้ในการรักษาพื้นที่ป่าไม้ที่ผ่านมาในอดีต เป็นการดำเนินงานโดยภาครัฐเป็นหลักแต่เพียงผู้เดียว ทำให้ไม่ได้ผลเท่าที่ควร มีการปรับกลยุทธ์ในการบริหารจัดการใหม่ โดยนอกจากจะเป็นการดำเนินงานโดยภาครัฐเช่นเดิมแล้ว ยังเพิ่มบทบาทภาคเอกชน องค์กรชุมชน และประชาชนให้เข้ามามีส่วนร่วมในการบริหาร-จัดการทรัพยากรป่าไม้เพื่อมุ่งเน้นการเพิ่มพื้นที่ป่าไม้ด้วยการปลูกป่า นอกจากเป็นการกระตุ้นให้เข้ามามีส่วนในการติดตามกำกับดูแลร่วมกับภาครัฐแล้ว ยังเป็นการปลูกฝังจิตสำนึกเกี่ยวกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเป็นการดำเนินการที่ให้ความสำคัญกับสิทธิบุคคล และชุมชนในการเข้ามามีส่วนร่วมกับการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (มาลี, 2545) นอกจากนี้ยุทธศาสตร์กรมป่าไม้ได้ระบุไว้ว่า รัฐมนตรีว่าการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มีนโยบายเร่งด่วนคือ ให้ทุกหน่วยงานให้ความสำคัญกับการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของประชาชนในการดูแลทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม นโยบายกลุ่มภารกิจด้านทรัพยากรธรรมชาติ คือ การลดความขัดแย้งในการใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าไม้และที่ดินของรัฐสร้างการมีส่วนร่วมของประชาชนและเอกชนในการปลูกป่า จัดการป่าชุมชน และปลูกป่าเศรษฐกิจ และนโยบายอื่นๆ (กรมป่าไม้, 2560) จากนโยบายงานดังกล่าว สามารถตระหนักได้ว่าหน่วยงานเพาะชำกล้าไม้จะต้องเป็นหน่วยงานหลักในการผลิตต้นกล้า เพื่อแจกจ่ายให้แก่ประชาชนและผู้สนใจปลูกฟื้นฟูทรัพยากรป่าไม้ ดังนั้นเพื่อการปฏิบัติงานที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในอนาคต การศึกษาถึงกระบวนการดำเนินงานของศูนย์ฯ ความพึงพอใจของประชาชนที่มาขอรับกล้าไม้ตลอดจนการพัฒนาแนวทางการดำเนินงานของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ อาจเป็นแนวทางหนึ่งในการฟื้นฟูทรัพยากรป่าไม้ที่ภาครัฐจะช่วยอำนวยความสะดวกต่อภาคประชาสังคมในการร่วมฟื้นฟูทรัพยากร-ป่าไม้ของประเทศให้บรรลุ เป้าหมายที่ตั้งไว้ได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. แบบสอบถาม
2. เครื่องบันทึกเสียง
3. เครื่องคอมพิวเตอร์ และซอฟต์แวร์ที่ใช้งานปฏิบัติงาน

วิธีการ

การศึกษาครั้งนี้ทำการศึกษาศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ ตั้งอยู่ที่ตำบลหน้าไม้ อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี โดยวิธีการศึกษาในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังนี้

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

1.1 ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) เป็นข้อมูลที่ได้มาโดยตรงจากการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้

1) สัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง (Semi- Structured Interview) เป็นการสัมภาษณ์ที่มีการเตรียมคำสำคัญเนื้อหาเฉพาะมาใช้ในการสัมภาษณ์ แต่เปิดโอกาสให้ผู้ถูกสัมภาษณ์ได้พูดเนื้อหาอื่น แต่มีความเกี่ยวข้องกับประเด็นที่ผู้สัมภาษณ์ต้องการ เพื่อไม่ให้เนื้อหาระหว่างการสัมภาษณ์มีเนื้อหาเสียมากจนเกินไป โดยใช้แนวคำถาม จากผู้ให้ข้อมูลหลัก ได้แก่ เจ้าหน้าที่ของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ และเกษตรกรผู้มาขอรับกล้าไม้ เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ แผนดำเนินงานของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ การปฏิบัติงานด้านเพาะชำกล้าไม้ การติดตามและประเมินผล และการตรวจสอบผลการดำเนินงาน และปัญหาอุปสรรคต่างๆ เป็นต้น

2) การสำรวจด้วยแบบสอบถาม (Questionnaire) เพื่อสำรวจความพึงพอใจของเกษตรกรผู้มาขอรับ-กล้าไม้ พัฒนาแบบสอบถามโดยการประยุกต์ข้อคำถามจากข้อมูลผู้มาขอรับกล้าไม้ ประกอบด้วย ข้อมูลพื้นฐานส่วนบุคคล ความต้องการกล้าไม้ ความพึงพอใจต่อการได้รับกล้าไม้ และการมีส่วนร่วมของเกษตรกรผู้มาขอรับกล้าไม้ในท้องที่ศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ ประชากรในการศึกษา คือ ผู้มาขอรับกล้าไม้จากศูนย์เพาะชำกล้าไม้-กรุงเทพฯ ในปี พ.ศ. 2560 จำนวน 1,017 คน กำหนดขนาดตัวอย่าง โดยใช้วิธีการคำนวณของ Yamane (1973) ได้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 287 คน สุ่มตัวอย่างด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Simple random sampling)

3) การสนทนากลุ่มย่อย การใช้เทคนิคการมีส่วนร่วมในการรับฟัง เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลความคิดเห็น โดยจะเสนอแนะแนวทางร่วมกันในการพัฒนาแนวทางส่งเสริมการปลูกป่าอย่างมีส่วนร่วม ประกอบด้วยกลุ่มตัวแทนเจ้าหน้าที่ของศูนย์ฯ และกลุ่มตัวแทนเกษตรกรผู้มาขอรับกล้าไม้

1.2 ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) โดยการศึกษาจากเอกสารวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น รายงานวิจัย เอกสารสิ่งพิมพ์ นโยบายป่าไม้ และเอกสารที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในและนอกพื้นที่ที่ศึกษา

2. การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลเชิงปริมาณจากแบบสัมภาษณ์ วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน กรณีข้อมูลเชิงคุณภาพ ทำการวิเคราะห์โดยข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์จะนำมาเรียบเรียงและอธิบายประกอบตัวเลขที่ได้จากการวิเคราะห์

จากข้อมูลที่รวบรวมได้นำมาสู่การวิเคราะห์สภาพการณ์ภายในและสภาพการณ์ภายนอกของศูนย์-เพาะชำกล้าไม้ โดยวิเคราะห์จุดแข็ง (Strengths) จุดอ่อน (Weaknesses) โอกาส (Opportunities) และอุปสรรค (Threats) หรือ SWOT Analysis (นันทิยาและณรงค์, 2551) จากนั้นประยุกต์ใช้ Tows Matrix เพื่อพัฒนาแนวทางการพัฒนาต่างๆ

ผลและวิจารณ์ผล

1. การดำเนินกิจกรรมของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ

ศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ ซึ่งได้ดำเนินการเพาะกล้าแจกจ่ายประชาชนในทุกปี เพื่อให้สามารถอธิบายกระบวนการทำงานของศูนย์ฯ ในการศึกษาครั้งนี้โดยใช้เทคนิค PDCA ได้ดังนี้

1.1 การกำหนดแผนงาน (Plan)

ในขั้นตอนของการกำหนดแผนงานประจำปีในหน่วยงานปกติของภาครัฐมักจะไม่ค่อยได้มีการกำหนดหัวข้อปัญหาก่อนการกำหนดแผนประจำปี ดังเช่นศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ ไม่ได้มีการสำรวจสภาพ

ปัจจุบันของศูนย์ และการตั้งเป้าหมายของงาน รวมถึงการวิเคราะห์หาสาเหตุและแนวทางการแก้ไขปัญหาเพื่อนำมาใช้ในการกำหนดแผน โดยแผนงานหลักของหน่วยงานคือผลิตกล้าไม้ ซึ่งประมาณการผลิตกล้าไม้ย้อนหลัง 5 ปี ได้แสดงใน Table 1

Table 1 The number of seedling at Forest Nursery Station of Bangkok in 2013-2017.

Year	The number of seedling: height less than 30 cm.(stem)	The number of seedling: height more than 30 cm.(stem)	Total (stem)
2013	200,000	86,000	286,000
2014	220,000	76,000	296,000
2015	230,000	86,000	316,000
2016	299,000	40,000	339,000
2017	370,000	40,000	410,000
Total	1,319,000	328,000	1,647,000

จากการสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้อง พบว่า แผนการผลิตกล้าซึ่งเป็นแผนหลักของศูนย์เพาะชำกล้าไม้-กรุงเทพฯ นั้นไม่ได้กล่าวถึงปัญหาอุปสรรคและข้อจำกัดการผลิตกล้าในแต่ละปี จนนำมาสู่จำนวนกล้าที่เหมาะสมที่สามารถดำเนินการได้ แต่มีนโยบายระดับกรม ระดับกระทรวง และระดับประเทศ มาช่วยสนับสนุน ให้มีการแจกจ่ายกล้าไม้ เพื่อเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้แก่ประเทศ เช่น ยุทธศาสตร์กรมป่าไม้ มีวิสัยทัศน์เพื่อบริหารจัดการทรัพยากรป่าไม้ให้มั่นคงและยั่งยืน จะมีเป้าหมายคือเพิ่มพื้นที่ป่าไม้อย่างน้อยร้อยละ 40 ของพื้นที่-ประเทศภายใน 20 ปี แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 ในยุทธศาสตร์ที่ 4 การเติบโตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน และนโยบายของรัฐมนตรี พลเอก ประยุทธ์ จันทร์โอชา ข้อ 9 (9.1) เร่งป้องกันและฟื้นฟูพื้นที่อนุรักษ์ทรัพยากรป่าไม้และสัตว์ป่า เป็นต้น (สำนักแผนงานและสารสนเทศ, 2560)

1.2 การปฏิบัติงาน (Do)

เป็นขั้นตอนของการลงมือปฏิบัติหรือแก้ไข ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้รวมถึงการสร้างและแสวงหาความรู้และจัดความรู้ให้เป็นระบบ ซึ่งจากการสัมภาษณ์ พบว่าในศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ นี้มีผู้บริหารที่มีภาวะเป็นผู้นำสามารถผลักดันการดำเนินงานไปสู่เป้าหมายได้และเจ้าหน้าที่ที่มีความชำนาญในการบริหารจัดการผลิต-กล้าไม้ แต่ยังขาดบุคลากรการปฏิบัติงาน ทั้งนี้สามารถดำเนินงานตามแผนการปฏิบัติงานได้ อันประกอบไปด้วยการจัดหาเมล็ดไม้ การเตรียมเรือนเพาะชำกล้าไม้และวัสดุเพาะชำกล้าไม้ การเพาะชำกล้าไม้ ระยะเวลาการเพาะชำกล้าไม้ การย้ายชำกล้าไม้ วิธีการดูแลรักษากล้าไม้ การแจกจ่ายกล้าไม้ และงบประมาณดำเนินการ เป็นต้น มีอุปสรรคในการดำเนินงาน คือ พื้นที่ศูนย์ฯเป็นดินเหนียวไม่เหมาะสม สำหรับการเพาะปลูก การเพาะชำกล้าไม้มีโรค รา และแมลง ทุกปี และไม่มีงบประมาณสำรองซื้อวัสดุจึงต้องใช้ทุนส่วนตัว อย่างไรก็ตามในปีงบประมาณ พ.ศ. 2556-2558 การผลิตกล้าไม้ดำเนินงานโดยศูนย์เพาะชำกล้าไม้ ส่วนปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560 ดำเนินการจัดซื้อจัดจ้างโดยวิธีเฉพาะเจาะจง ซึ่งจะจ้างเอกชนเข้ามาดำเนินงานผลิตกล้าไม้แทน ซึ่งการเปลี่ยนรูปแบบการผลิตกล้าไม้นี้มีความสะดวกในเรื่องการเงิน แต่องค์ความรู้ ประสบการณ์ของผู้ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกล้าไม้รวมถึงเทคโนโลยีใหม่ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น ไม่ถูกถ่ายทอดหรือเป็นองค์ความรู้ที่ศูนย์ฯ จะสามารถรวบรวมไว้ได้

สำหรับการแก้ปัญหาในอนาคต จะส่งผลให้บทบาทของศูนย์ฯ ลดลงและทำให้ศูนย์ขาดความเชี่ยวชาญในการเพาะชำ ซึ่งเป็นงานหลักในการดำเนินงานของหน่วยงาน หากไม่มีบทบาท ศูนย์ฯจะทำหน้าที่แค่ส่วนบริหารจัดการเท่านั้น

1.3 การติดตามและประเมินผล (Check)

ในการติดตามการดำเนินงานมีการติดตามตามระเบียบของกรมป่าไม้และตามสั่งการอธิบดีหรือกระทรวงเพื่อที่จะติดตามเพิ่มเติม โดยการลงพื้นที่และเก็บข้อมูลตามแบบติดตามประเมินผลการปลูกต้นไม้ที่แจกจ่าย ในส่วนนี้ยังขาดงบประมาณในการติดตามการปลูกกล้าไม้ เพราะพื้นที่เป้าหมายห่างไกลจากศูนย์ฯ พื้นที่รับผิดชอบของศูนย์ฯ มีจำกัด แต่ผู้มาขอรับกล้าไม้มารับทั่วประเทศ อย่างไรก็ตามในมิติการมีส่วนร่วมของประชาชนที่ทางศูนย์ฯ ได้ดำเนินการ คือ การสอบถามความคิดเห็นเกี่ยวกับชนิดกล้าไม้ที่ต้องการให้หน่วยงาน-เพาะชำ แต่จากการส่งแบบสอบถามไปสอบถามองค์การปกครองส่วนท้องถิ่นต่างๆ ในพื้นที่บริการยังไม่ได้รับการตอบรับ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดการส่วนร่วมกับศูนย์ และการสำรวจความต้องการกล้าไม้ข้ามปี ต้นไม้โตไม่ทันตามความต้องการของประชาชน การสำรวจนี้ประชาชนจะมีส่วนร่วมในการให้ความคิดเห็นและความต้องการกล้าไม้ในแต่ละชนิดที่ศูนย์ฯจะสามารถเพาะชำให้ได้ แต่ประชาชนยังไม่มีส่วนร่วมในงานหลักของศูนย์ฯ ในด้านขององค์ความรู้จะไม่ถูกกลั่นกรองเพื่อนำไปสู่การปฏิบัติในอนาคต รวมถึงปัจจัยต่างๆ อันเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดำเนินงานของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ จะไม่ถูกจำกัด ด้วยไม่มีเวทีสำหรับการประมวลผลการดำเนินต่างๆ

1.4 การตรวจสอบผลการดำเนินงาน (Action)

ในด้านการตรวจสอบเป็นการรวบรวมและบันทึกข้อมูล เพื่อจัดทำรายงานประจำปีส่งกรมป่าไม้ ซึ่งเป็นภารกิจที่ต้องดำเนินการหากแต่มองในแง่การพัฒนางานที่ต่อเนื่องแล้ว จากการสัมภาษณ์ยังไม่พบกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งปัน แลกเปลี่ยนและเรียนรู้ร่วมกัน จะส่งผลให้การดำเนินงานไม่เกิดการพัฒนาที่ต่อเนื่อง

สถานการณ์ของหน่วยงานยังมีปัญหาและอุปสรรคในกระบวนการ PDCA ดังนี้ 1) ปัญหาด้านแผนงาน ในแต่ละปีมีแผนงานเปลี่ยนไปตามนโยบายของกรมและผู้บริหาร ซึ่งทำให้การปฏิบัติงานการดำเนินการจัดซื้อจัดจ้างไม่ต่อเนื่อง ส่งผลกระทบกับการจ้างเหมาแรงงานของศูนย์ฯ 2) ปัญหาด้านการปฏิบัติงาน วัสดุในการเพาะชำกล้าไม้หายาก และเมล็ดไม้บางชนิดหายากในพื้นที่ บางครั้งจะต้องมีการสั่งซื้อกันล่วงหน้า แต่เมล็ดไม้บางชนิดจะได้รับการสนับสนุนจากสำนักวิจัยและพัฒนาป่าไม้ กรมป่าไม้ และยังขาดวัสดุอุปกรณ์สำนักงานรวมทั้งค่าสาธารณูปโภคไม่เพียงพอในการดำเนินกิจกรรม เช่น ไฟฟ้า โทรศัพท์ น้ำ ไม่มีอินเตอร์เน็ต อาคารสำนักงานเป็นอาคารชั่วคราว สำหรับอุปกรณ์สำนักงานบางอย่างที่จำเป็นจะได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานส่วนกลาง

ในการศึกษาการดำเนินกิจกรรมของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯด้วย PDCA นี้ทำให้เห็นว่ายังมีช่องทางการพัฒนางานหรือกิจกรรมอื่นๆ เพิ่มขึ้นในศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ เพื่อให้การผลิตกล้าไม้ให้มีประสิทธิภาพ และพร้อมกับพัฒนาบุคลากรในศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ ไปพร้อมกันด้วย

2. ลักษณะทั่วไปของผู้มาขอรับกล้าไม้

จากการศึกษาลักษณะทั่วไปของกลุ่มตัวอย่างผู้มาขอรับกล้าไม้ ณ ศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯในปี พ.ศ. 2560 พบว่ามี ผู้มาขอรับกล้าไม้ส่วนใหญ่มีอายุจะอยู่ในช่วง 36-45 ปี ร้อยละ 46.3 การศึกษา ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงปริญญาตรี ร้อยละ 49.8 และประกอบอาชีพรับราชการ/รัฐวิสาหกิจ ร้อยละ 33.1 รายละเอียดดัง Table 2

Table 2 Some basic characteristics of sample (n=287).

Sample characteristics	Number of sample (person)	Percent
Age (year)		
15-25	8	2.8
26-35	56	19.5
36-45	133	46.3
46-55	53	18.5
56-65	29	10.1
>65	8	2.8
Education		
Compulsory Education (P.4 or P.6)	21	7.3
Junior High School	43	15.0
Senior High School or Vocational Certificate	58	20.2
High Vocational Certificate	18	6.3
Bachelor's Degrees	143	49.8
Higher Graduate	4	1.4
Occupations		
Government Officer/State enterprise	95	33.1
Private Company	54	18.8
Farmer	88	30.7
Merchant/personal business	27	9.4
Wage labor	23	8.0

3. **ความพึงพอใจของผู้มารับบริการกล้าไม้**

จากการศึกษาระดับความพึงพอใจในการขอรับกล้าไม้จาก ศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ เมื่อแบ่งการประเมินความพึงพอใจออกเป็น 6 ด้าน ได้แก่ 1) ความพึงพอใจต่อกระบวนการขอรับกล้าไม้ พบว่าผู้ขอรับกล้าไม้ให้คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย 4.98 คะแนน 2) ความพึงพอใจต่อการขอรับกล้าไม้ พบว่าผู้ขอรับกล้าไม้ให้คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย 4.98 คะแนน 3) ความพึงพอใจต่อความสะอาดของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ พบว่าผู้ขอรับกล้าไม้ให้คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย 4.97 คะแนน 4) ความพึงพอใจต่อการทำงานของเจ้าหน้าที่ของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ พบว่าผู้ขอรับกล้าไม้ให้คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย 4.98 คะแนน 5) ความพึงพอใจต่อกล้าไม้ที่ได้รับการสนับสนุน พบว่าผู้ขอรับกล้าไม้ให้คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย 4.97 คะแนน และ 6) ความพึงพอใจต่อเอกสารเผยแพร่ความรู้ของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ พบว่าผู้ขอรับกล้าไม้ให้คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย 4.94 คะแนน จากคะแนนเต็ม 5 คะแนน นอกจากนี้ในการสำรวจความพึงพอใจของผู้มาขอรับกล้าไม้ส่วนใหญ่อยู่ในระดับดีและดีมาก แสดงให้เห็นว่าศูนย์ฯปฏิบัติงานได้เป็นที่น่าพอใจมาก แต่ในภาคปฏิบัตินั้น หากมีพื้นที่ให้เสนอความคิดเห็นของประชาชนจะทำให้มีข้อมูลเพิ่มอีกด้านและประชาชนจะมีส่วนร่วมในการให้ความคิดเห็นมากขึ้น

4. การวิเคราะห์สถานการณ์ภายนอกและสถานการณ์ภายในของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจะวิเคราะห์จากกลุ่มตัวอย่างในปี พ.ศ. 2560 สามารถวิเคราะห์จุดแข็ง (Strengths) จุดอ่อน (Weaknesses) โอกาส (Opportunities) และอุปสรรค (Threats) หรือ SWOT Analysis วิเคราะห์ได้ดังนี้ Table 3

Table 3 SWOT Analysis.

Strengths: S	Weakness: W
1) The leadership of the officer that pushing the goal success. (S1) 2) Officers and staffs are professional in seedling management. (S2) 3) The nursery station has a clear functioning system. (S3) 4) Good quality of seed. (S4) 5) The officers and staffs are willing to provide services to the public.(S5)	1) The operating plan changes by the policy. (W1) 2) Lack of public relation. (W2) 3) The trees that grow slowly, it is not suitable for the seedlings distribution. (W3) 4) Lack of the budget for monitoring and evaluation. (W4) 5) Lack of cooperation from the public to follow tree planting. (W5)
Opportunities: O	**Threats: T**
1) The government strategy and policy aims to increase the green areas. (O1) 2) The nursery station gets support tree seed from other agencies. (O2)	1) Limitation by law of some tree species. (T1) 2) The public lack of awareness on forest resource conservation. (T2) 3) Climate change that affect to tree growing conditions. (T3) 4) The strategy plan formulation of Royal forest department not based on the current situation. (T4)

5. การวิเคราะห์แนวทางการดำเนินงานของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ

การกำหนดยุทธศาสตร์ในการดำเนินงานของศูนย์เพาะชำกล้าไม้ โดยการจับคู่ระหว่าง จุดแข็งกับโอกาส จุดแข็งกับอุปสรรค จุดอ่อนกับโอกาส และจุดอ่อนกับอุปสรรค ด้วยวิธีการ TOWS matrix ได้ยุทธศาสตร์หลัก 4 ยุทธศาสตร์ คือ

1. ยุทธศาสตร์เชิงรุก (S5, O1) คือ การส่งเสริมให้ประชาชนนำกล้าไม้จากศูนย์เพาะชำกล้าไม้ไปปลูกในพื้นที่ต่างๆ

2. ยุทธศาสตร์เชิงป้องกัน (S2, T4) คือ การใช้ความชำนาญในการปฏิบัติหน้าที่ปรับวิธีการทำงานให้สอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบัน

3. ยุทธศาสตร์เชิงแก้ไข (W2, O1) คือ การเพิ่มศักยภาพรูปแบบวิธีการประชาสัมพันธ์การปลูกกล้าไม้

4. ยุทธศาสตร์เชิงรับ (W5, T2) คือ สร้างความเข้าใจในการอนุรักษ์ทรัพยากรป่าไม้และประชาสัมพันธ์สร้างเครือข่ายกับประชาชน

สรุป

แนวทางในการดำเนินงานของศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯมีค่อนข้างเป็นระบบ ซึ่งเมื่อวางระบบการทำงานแบบวงจร PDCA แล้วทำให้ชัดเจนขึ้น วงจรการทำงานของศูนย์ฯเริ่มจากกำหนดแผนงาน (Plan) ของแต่ละปีนั้น ขึ้นอยู่กับนโยบายหน่วยงาน เพราะมีโครงการบางปีที่มีและยกเลิกไปตามนโยบาย การปฏิบัติงาน (Do) ซึ่งจากเดิมก่อนปี พ.ศ. 2558 จะดำเนินโดยศูนย์ฯเองทุกอย่าง แต่หลังจากปี พ.ศ. 2558 การดำเนินงานก็จะเปลี่ยนไปจากการดำเนินงานด้วยศูนย์เองทั้งหมดก็จะเปลี่ยนไปเป็นการจ้างงานโดยเอกชน ความชำนาญในการปฏิบัติงานก็จะเป็นปัญหาในการปฏิบัติงาน การติดตามและประเมินผล (Check) จะทำตามระเบียบกรมป่าไม้ แต่การปฏิบัติงานมีปัญหาในเรื่องงบประมาณการติดตาม และจะดำเนินการตรวจสอบความต้องการกล้าไม้ปีถัดไป และการตรวจสอบผลการดำเนินงาน (Action) จะเป็นการรายงานประจำปีให้กรมป่าไม้ทราบ ยังไม่มีการตรวจสอบการดำเนินงานเพื่อไปปรับปรุงแก้ไขในปีถัดไป สำหรับแนวทางการแจกจ่ายกล้าไม้ของศูนย์ฯ ได้แก่ การส่งเสริมให้ประชาชนนำกล้าไม้จากศูนย์เพาะชำกล้าไม้ไปปลูกในพื้นที่ต่างๆ การใช้ความชำนาญในการปฏิบัติหน้าที่ปรับวิธีการทำงานให้สอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบัน การเพิ่มศักยภาพรูปแบบวิธีการประชาสัมพันธ์การปลูกกล้าไม้และสร้างความเข้าใจในการอนุรักษ์ทรัพยากรป่าไม้และประชาสัมพันธ์สร้างเครือข่ายกับประชาชน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณนายนพดล โอภาสเสถียร และเจ้าหน้าที่ศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลวิจัย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมป่าไม้. 2560. **ยุทธศาสตร์กรมป่าไม้ ระยะ 20 ปี พ.ศ. 2560-2579**. จาก https://www.forest.go.th/planning/wp-content/uplonds/sites/6/2017ยุทธศาสตร์-กรมป่าไม้-2560-2579.pdf, 20 เมษายน 2562

มาลี เสริมวงศ์ตระกูล. 2545. **ความพึงพอใจของประชาชนที่มาขอรับกล้าไม้ของหน่วยส่งเสริม-การปลูกป่าที่ 5 จังหวัดสุรินทร์**. สำนักส่งเสริมการปลูกป่า. (อัดสำเนา)

ศูนย์เพาะชำกล้าไม้กรุงเทพฯ . 2560. **รายงานสรุปผลดำเนินงาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560**. กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

สำนักจัดการที่ดินป่าไม้. 2560. **เนื้อที่ป่าไม้ของประเทศไทย ปี พ.ศ.2516-2560**. จาก http://forestinfo.forest.go.th/55/Content.aspx?id=72, 1 พฤษภาคม 2562

สำนักแผนงานและสารสนเทศ. 2560. **ยุทธศาสตร์กรมป่าไม้ ระยะ 20 ปี พ.ศ. 2560-2579**. จาก https://www.forest.go.th/planning/planning20/

Bereskie,T. M.J. Rodriguez and R. Sadiq. 2560. **Drinking Water Management and Governance in Canada: An Innovative Plan-Do-Check-Act (PDCA) Framework for a Safe Drinking Water Supply**. M.E. Thesis, University of British Columbia.

Weihrich, H., V. C. Mark and K. Harold 2008. **Management: A Global and Entrepreneurial Perspective. 12th ed.** Taka McGraw Hill Education Private Limited. New Delhi.

Yamane,T. 1973. **Statistics: An Introductory Analysis. 3 Ed.** Harper and Row, New York.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Subject: Natural Resources and Environment

ภาคโปสเตอร์
Poster Presentation

KASETSART UNIVERSITY

ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมทางธุรกิจและความต้องการไม้จากสวนป่า ตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ในจังหวัดสระแก้ว

The Relationship between Business of Environment and Wood Requirement from Forest Plantation along with Commercial Forest Plantation Act, B.E. 2558 (Issue 2) of Wood Industry Entrepreneurs in Sa Kaeo Province

ธนพล โนนเภา[1*] จงรัก วัชรินทร์รัตน์[1] และ นิคม แหลมสัก[1]

Thanapon Nonpao[1*], Chongrak Wachrinrat[1] and Nikhom Laemsak[1]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของข้อมูลความเห็นเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมทางธุรกิจของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ในจังหวัดสระแก้ว จำนวน 45 ราย และการตัดสินใจเลือกใช้ไม้วัตถุดิบที่ได้จากการทำสวนป่า ตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถาม โดยผลการวิจัยพบว่า สภาพแวดล้อมทางธุรกิจด้านสังคม มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองของผู้ซื้อไม้ ในประเด็นด้านคุณลักษณะ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) เท่ากับ 0.32 และสภาพแวดล้อม ทางธุรกิจด้านเทคโนโลยี มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองของผู้ซื้อไม้ในประเด็นด้านเวลา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) เท่ากับ 0.37 หมายความว่า ปัจจัยดังกล่าวมีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกในระดับปานกลาง ดังนั้น หากต้องการส่งเสริมการใช้ไม้จากสวนป่า ควรส่งเสริมด้านภาพลักษณ์ที่ดีของการใช้ผลิตภัณฑ์จากไม้และพัฒนาด้านเทคโนโลยีการผลิตเป็นอันดับแรก

ABSTRACT

The purposes of this research were to study the relationship on opinions for Business Environment and Wood Requirement of Wood Industry Entrepreneurs from 45 populations in Sa Kaeo Province response to selected plantation woods along with Commercial Forest Plantation Act, B.E. 2558 (Issue 2). Data were collected by using questionnaire. The results revealed that Business Environment (Social) related Response (Wood characteristics), The Correlation Coefficient was moderate (ρ = 0.32) and Business Environment (Technology) related Response (Time), The Correlation Coefficient was moderate (ρ = 0.37) Therefore, if wanting to promote wood requirement from forest plantation, the first priority should be to promote the positive image of products from wood and improvement production technology.

Key words: Commercial Forest Plantation Act, Business Environment, Wood Industry

* Corresponding author; e-mail address: Thanaponnp@hotmail.com

[1]คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การปรับปรุงแก้ไขกฎหมายตามพระราชบัญญัติสวนป่า ส่งผลต่อแนวทางปฏิบัติตามกฎหมายของพนักงานเจ้าหน้าที่และการดำเนินการในส่วนของประชาชนหรือองค์กรที่ประกอบกิจการด้านสวนป่าในพื้นที่ของตนเอง ด้านการปรับปรุงข้อกฎหมาย มีรายละเอียดที่ทำให้ไม้ที่ได้มาตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่2) พ.ศ. 2558 แตกต่างไปจากกฎหมายฉบับเดิม เช่น ชนิดไม้ เอกสารรับรอง โทษทางกฎหมาย กระทบต่อการตัดสินใจเลือกใช้ไม้ที่ได้มาตามกฎหมายดังกล่าวเข้าสู่การผลิตในกิจการอุตสาหกรรมไม้ที่แตกต่างไปจากเดิม

กิจการอุตสาหกรรมไม้ เป็นกิจการการผลิต แปรรูป เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์จากไม้ จึงมีความเชื่อมโยงหลายด้าน ทั้งจากภายในกิจการเอง และภายนอกกิจการที่ส่งผลต่อธุรกิจ สอดคล้องกับทฤษฎีปัจจัยแวดล้อมทางธุรกิจ แบ่งเป็น สภาพแวดล้อมภายใน ซึ่งเป็นทรัพยากรของกิจการหรือสิ่งที่มีอยู่ภายในกิจการที่สามารถควบคุมได้ เช่น คน เครื่องจักรกลฯ และสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งเป็นสิ่งที่มีอยู่ภายนอกองค์กรซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ แต่มีความสำคัญต่อกิจการหรือองค์กรอย่างยิ่ง เช่น นโยบายรัฐ กฎหมายฯ (ศศิวิมล, 2547) หากนำมาศึกษาเปรียบเทียบปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จะเกิดประโยชน์ต่อการส่งเสริมการปลูกสร้างสวนป่า การบริหารจัดการกิจการอุตสาหกรรมไม้ ทั้งในท้องที่จังหวัดสระแก้ว และภาพรวมของประเทศ ตลอดจนเป็นแนวทางการปฏิบัติงานของพนักงานเจ้าหน้าที่ด้วย

จังหวัดสระแก้วมีผู้ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ จำนวน 45 ราย ที่มีวัตถุประสงค์ต่างๆ ตามลักษณะผลิตภัณฑ์ (สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติละสิ่งแวดล้อมจังหวัดสระแก้ว, 2560) ผู้วิจัยพบว่าจังหวัดสระแก้วมีกิจการแปรรูปไม้หลากหลายประเภท มีการใช้ไม้โดยใช้ไม้วัตถุดิบจากหลายแหล่งวัตถุดิบรวมถึงไม้จากกฎหมายสวนป่าด้วย จึงทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมทางธุรกิจที่ส่งผลต่อการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่าตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ในจังหวัดสระแก้ว เพื่อหาระดับความสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการส่งเสริมให้ผู้ประกอบกิจการ ตัดสินใจเลือกใช้ไม้วัตถุดิบจากสวนป่าเพิ่มมากขึ้น ต่อไป

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายของข้อมูลความเห็นในด้านสภาพแวดล้อมทางธุรกิจและประเด็น ที่มีผลต่อการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่า ตาม พระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมทางธุรกิจกับการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่าตาม พระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558

คำนิยาม

Buyer’s response การตอบสนองของผู้บริโภค ในที่นี้คือผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ในจังหวัดสระแก้ว การแสดงออกของผู้ประกอบการแต่ละราย เกี่ยวข้องกับการใช้ไม้วัตถุดิบจากสวนป่า รวมทั้งกระบวนการในการตัดสินใจที่ส่งผลต่อการเลือก

Wood characteristics คุณลักษณะของไม้ที่ต้องการ โดยพิจารณาจาก ชนิดไม้ เนื้อไม้ ขนาดไม้ ลวดลายไม้ ตำหนิของเนื้อไม้ และเอกสารการรับรองทางกฎหมาย

แนวคิดการวิจัย

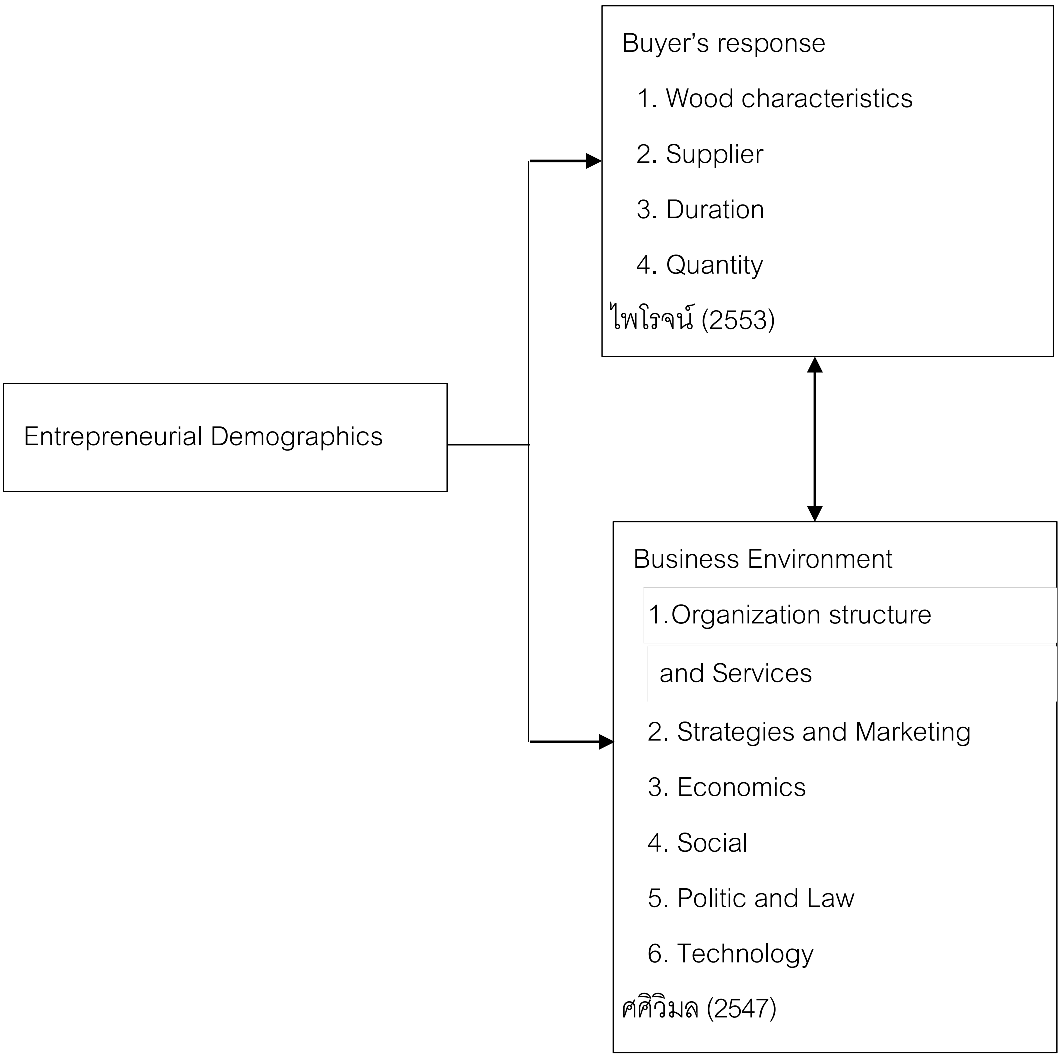


Figure 1 Conceptual framework.

Supplier ผู้ขายไม้ โดยพิจารณาจาก ความน่าเชื่อถือ ชื่อเสียงของผู้ขาย ความสะดวกในการติดต่อซื้อขาย ราคา การโฆษณาส่งเสริมการขาย และการได้เห็นตัวอย่างสินค้า

Duration เวลา โดยพิจารณาจาก ระยะเวลาและความสะดวกในการขนย้ายไม้ไปยังโรงงาน ความสะดวกในการนำเครื่องจักรเข้าไปตัดฟัน ช่วงเวลาหรือฤดูกาลที่สามารถหาแรงงานในพื้นที่ และช่วงเวลาที่สะดวกในการตัดฟัน

Quantity ปริมาณ โดยพิจารณาจาก ปริมาณไม้เป็นไปตามความต้องการ และความสามารถในการป้อนการผลิตได้อย่างสม่ำเสมอ

Business Environment ปัจจัยต่างๆ ซึ่งส่งผลต่อสภาพแวดล้อมของธุรกิจ อาจส่งผลกระทบต่อธุรกิจทั้งในด้านบวกและด้านลบ ซึ่งสภาพแวดล้อมของธุรกิจอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สภาพแวดล้อมภายในองค์กร เป็นปัจจัยที่อยู่ภายในองค์กรที่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ โครงสร้างองค์กรและลักษณะของธุรกิจ ลักษณะการตลาด และสภาพแวดล้อมภายนอกองค์กร เป็นปัจจัยที่อยู่ภายนอกองค์กรไม่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ ด้านเศรษฐกิจ ด้านสังคม ด้านการเมือง กฎหมาย และด้านเทคโนโลยี

Organization structure and Services โครงสร้างองค์กรและลักษณะของธุรกิจ โดยพิจารณาจากกิจการที่มีการวางโครงสร้าง แผนกหน้าที่ การวางแผนการผลิต การคำนวณปริมาณวัตถุดิบ การผลิตผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย การใช้เทคโนโลยีบริหารกิจการ การใช้พนักงานที่ประสบการณ์สูง การตรวจสอบคุณภาพสินค้า การวางแผนขยายกิจการ

Strategies and Marketing ลักษณะการตลาด โดยพิจารณาจาก การกำหนดให้ไม้สวนป่าเป็นวัตถุดิบผลิต การปรับเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ตามความพึงพอใจลูกค้า การผลิตและจัดจำหน่าย การกำหนดราคา การสร้างช่องทางการตลาด การรวมกลุ่มผู้ประกอบการ กลยุทธ์การสร้างความแตกต่างให้กับสินค้า และมาตรฐานการผลิตและการรับประกันคุณภาพ

Economics ด้านเศรษฐกิจ โดยพิจารณาจาก นโยบายทางเศรษฐกิจจากภาคส่วนต่างๆนโยบายรัฐบาล การขยายของตลาด และการส่งเสริมการส่งออก

Social ด้านสังคม โดยพิจารณาจาก ความเชื่อมั่นในคุณภาพของไม้จากสวนป่า กระแสความนิยมด้าน Eco design ภาพลักษณ์ของการครอบครองผลิตภัณฑ์จากไม้

Politic and Law ด้านกฎหมาย โดยพิจารณาจาก กฎหมาย ระเบียบ ที่เกี่ยวกับสวนป่า การควบคุมแหล่งที่มาที่ถูกกฎหมาย ความมั่นใจในการลงทุน และขยายกิจการ การควบคุม กำกับ จากพนักงานเจ้าหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยสวนป่า กฎหมายด้านแรงงาน และกฎหมายอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับกิจการของท่าน

Technology ด้านเทคโนโลยี โดยพิจารณาจาก การพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องจักรในการผลิต การพัฒนาเทคโนโลยีด้านการเคลื่อนย้ายหรือขนส่ง

ประชากร

ประชากรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ในจังหวัดสระแก้วทั้งหมด จำนวน 45 ราย (สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดสระแก้ว, 2560)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ แบบสอบถาม (Questionnaire) โดยการตั้งคำถามแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 แบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลประชากรศาสตร์ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ในจังหวัดสระแก้ว ได้แก่ ประเภทผู้ประกอบการ ที่ตั้งของกิจการ ระยะเวลาที่เปิดกิจการ เงินลงทุน ประเภทกิจการ ที่มาของไม้วัตถุดิบในการผลิต กำลังเครื่องจักร จำนวนพนักงาน ลักษณะคำถาม ในส่วนนี้เป็นคำถามแบบให้เลือกตอบ (Check List)

ส่วนที่ 2 แบบสอบถามเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมทางธุรกิจของกิจการ ได้แก่ โครงสร้างองค์กรและลักษณะของธุรกิจ ด้านกลยุทธ์ของกิจการ ด้านเศรษฐกิจ ด้านสังคม ด้านกฎหมาย การเมือง ด้านเทคโนโลยี

ส่วนที่ 3 แบบสอบถามเกี่ยวกับประเด็นการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่า ตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 ได้แก่ ด้านคุณลักษณะของไม้ที่ต้องการ ด้านผู้ขาย ด้านเวลา ด้านปริมาณ

แบบสอบถามส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 มีลักษณะเป็นแบบมาตราวัดแบบ Likert Scale เป็น 5 ระดับ (บุญชม และ บุญส่ง, 2535)

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive Analysis) ดังนี้

1.1 นำข้อมูลในแบบสอบถามส่วนที่ 1 ข้อมูลของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ในจังหวัดสระแก้ว ได้แก่ ประเภทผู้ประกอบการ ที่ตั้งของกิจการ ระยะเวลาที่เปิดกิจการ เงินลงทุน ประเภทกิจการ ที่มาของไม้วัตถุดิบในการผลิต กำลังเครื่องจักร จำนวนพนักงาน มาวิเคราะห์แจกแจงความถี่ (Frequency) และนำเสนอผลเป็นค่าร้อยละ (Percentage)

1.2 แบบสอบถามส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 เป็นแบบสอบถามเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมทางธุรกิจของกิจการ และประเด็นการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่ามีลักษณะเป็นแบบมาตราวัดแบบ Likert Scale เป็น 5 ระดับคือ

5 หมายถึง ความเห็นผู้ประกอบกิจการเห็นด้วยกับคำถามมากที่สุด

4 หมายถึง ความเห็นผู้ประกอบกิจการเห็นด้วยกับคำถามมาก

3 หมายถึง ความเห็นผู้ประกอบกิจการเห็นด้วยกับคำถามปานกลาง

2 หมายถึง ความเห็นผู้ประกอบกิจการเห็นด้วยกับคำถามน้อย

1 หมายถึง ความเห็นผู้ประกอบกิจการเห็นด้วยกับคำถามน้อยที่สุด

โดยกำหนดเกณฑ์การแปลความหมายของระดับคะแนน ค่าเฉลี่ยของความต้องการใช้ไม้

คะแนนเฉลี่ย 4.51-5.00 หมายถึง ความต้องการไม้จากสวนป่า ตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 อยู่ในระดับมากที่สุด

คะแนนเฉลี่ย 3.51-4.50 หมายถึง ความต้องการไม้จากสวนป่า ตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 อยู่ในระดับมาก

คะแนนเฉลี่ย 2.51-3.50 หมายถึง ความต้องการไม้จากสวนป่า ตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 อยู่ในระดับปานกลาง

คะแนนเฉลี่ย 1.51-2.50 หมายถึง ความต้องการไม้จากสวนป่า ตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 อยู่ในระดับน้อย

คะแนนเฉลี่ย 1.00-1.50 หมายถึง ความต้องการไม้จากสวนป่า ตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 อยู่ในระดับน้อยที่สุด

โดยใช้ข้อมูลมาหาค่าการกระจายของประชากร ได้แก่ ค่าเฉลี่ยประชากร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร และจัดระดับความคิดเห็น

2. การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficien: ρ) โดยใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมทางธุรกิจ และการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่า ในการคำนวนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) และแปลผลตามเกณฑ์ของ (สุนีย์, 2536) ดังนี้

0.75 ถึง 1.00 มีความสัมพันธ์ทิศทางบวก ในระดับสูงยิ่ง

0.50 ถึง 0.74 มีความสัมพันธ์ทิศทางบวก ในระดับสูง

0.25 ถึง 0.49 มีความสัมพันธ์ทิศทางบวก ในระดับปานกลาง

0.00 ถึง 0.24 มีความสัมพันธ์ทิศทางบวก ในระดับต่ำ

-0.25 ถึง -0.49 มีความสัมพันธ์ทิศทางลบในระดับปานกลาง

-0.50 ถึง -0.74 มีความสัมพันธ์ทิศทางลบ ในระดับสูง

-0.75 ถึง -1.00 มีความสัมพันธ์ทิศทางลบ ในระดับสูงยิ่ง

ผลและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์เชิงพรรณนา

ข้อมูลประชากรศาสตร์ของผู้ตอบแบบสอบถาม

ประเภทผู้ประกอบการ ส่วนใหญ่เป็นบุคคลธรรมดา จำนวน 30 ราย คิดเป็นร้อยละ 66.67 และเป็นนิติบุคคล จำนวน 15 ราย คิดเป็นร้อยละ 33.33

สถานที่ตั้ง ของกิจการส่วนใหญ่อยู่ในอำเภอเมืองสระแก้ว จำนวน 12 ราย คิดเป็นร้อยละ 26.67 รองลงมา อยู่ในอำเภอวังน้ำเย็น จำนวน 10 ราย คิดเป็นร้อยละ 22.22 ถัดมาอยู่ในอำเภอ ตาพระยา อำเภอคลองหาด อำเภอละ 5 ราย คิดเป็นร้อยละ 11.11 อยู่ในอำเภอวัฒนานคร จำนวน 4 ราย คิดเป็นร้อยละ 8.89 อยู่ในอำเภอโคกสูง จำนวน 3 ราย คิดเป็นร้อยละ 6.67 และอยู่ในอำเภออรัญประเทศ อำเภอเขาฉกรรจ์ อำเภอวังสมบูรณ์ จำนวน 2 ราย คิดเป็นร้อยละ 4.44

ระยะเวลาการประกอบกิจการ ระยะเวลาก่อตั้งกิจการโดยนับตั้งแต่ได้รับอนุญาตให้ทำการแปรรูปไม้ตามกฎหมาย ส่วนใหญ่มีระยะเวลาประกอบกิจการ 11-15 ปี จำนวน 17 ราย คิดเป็นร้อยละ 37.78 รองลงมาเป็นระยะเวลาประกอบกิจการ 5-10 ปี จำนวน 9 ราย คิดเป็นร้อยละ 20 ระยะเวลาประกอบกิจการน้อยกว่า 5 ปี จำนวน 7 ราย คิดเป็นร้อยละ 15.56 ระยะเวลาประกอบกิจการ 16-20 ปี จำนวน 7 ราย คิดเป็นร้อยละ 15.56 และระยะเวลาประกอบกิจการมากกว่า 20 ปี จำนวน 5 ราย คิดเป็นร้อยละ 11.11

เงินลงทุน ของกิจการส่วนใหญ่มากกว่า 3 ล้านบาท จำนวน 16 ราย คิดเป็นร้อยละ 35.56รองลงมาเป็นเงินลงทุนมากกว่า 2 ล้านบาท-2.5 ล้านบาท จำนวน 8 ราย คิดเป็นร้อยละ 17.78 เงินลงทุนมากกว่า 1.5 ล้านบาท- 2 ล้านบาท จำนวน 7 ราย คิดเป็นร้อยละ 15.56 เงินลงทุนมากกว่า 2.5 ล้านบาท-3 ล้านบาท จำนวน 5 ราย คิดเป็นร้อยละ 11.11 เงินลงทุนน้อยกว่า 500,000 บาท จำนวน 4 ราย คิดเป็นร้อยละ 8.89 เงินลงทุน 500,000-1 ล้านบาท จำนวน 3 ราย คิดเป็นร้อยละ 6.67 และเงินลงทุนมากกว่า 1 ล้านบาท-1.5 ล้านบาท จำนวน 2 ราย คิดเป็นร้อยละ 4.44

ประเภทของกิจการ แยกตามการอนุญาตตามกฎหมาย ส่วนใหญ่เป็นประเภทโรงงานแปรรูปไม้โดยใช้เครื่องจักรเพื่อประดิษฐกรรม จำนวน 23 ราย คิดเป็นร้อยละ 51.11 รองลงมาเป็นโรงงานแปรรูปไม้โดยใช้เครื่องจักรเพื่อผลิตชิ้นไม้สับ จากไม้ที่ปลูกขึ้นโดยเฉพาะฯ จำนวน 18 ราย คิดเป็นร้อยละ 40 ถัดมาเป็นโรงงานแปรรูปไม้โดยใช้เครื่องจักรลักษณะอุตสาหกรรมต่อเนื่อง และโรงงานแปรรูปไม้โดยใช้แรงคน ประเภทละ 2 ราย คิดเป็นร้อยละ 4.44

แหล่งวัตถุดิบ สำหรับป้อนกิจการส่วนใหญ่ได้มาจากสวนป่าเอกชน คิดเป็นร้อยละ 27.66 รองลงมาได้มาจากไม้ในที่ดินกรรมสิทธิ์ คิดเป็นร้อยละ 26.24 ถัดมาได้มาจากการจัดซื้อจากกิจการค้าไม้ท่อน ไม้แปรรูป

ของเอกชน คิดเป็นร้อยละ 24.11 นำเข้าจากต่างประเทศ คิดเป็นร้อยละ 12.06 จากสวนป่ารัฐบาล องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ สัมปทาน ประทานบัตร คิดเป็นร้อยละ 9.93

กำลังเครื่องจักร กิจการส่วนใหญ่มีเครื่องจักรที่มีกำลัง 200-399 แรงม้า จำนวน 15 ราย คิดเป็นร้อยละ 33.33 ถัดมา กำลัง 400-599 แรงม้า จำนวน 11 ราย คิดเป็นร้อยละ 24.44 กำลัง 600-799 แรงม้า จำนวน 9 ราย คิดเป็นร้อยละ 20 กำลัง 800-999 แรงม้า จำนวน 5 ราย คิดเป็นร้อยละ 11.11 กำลัง 1000 แรงม้าขึ้นไป จำนวน 3 ราย คิดเป็นร้อยละ 6.67 และกำลัง 5-199 แรงม้า จำนวน 2 ราย คิดเป็นร้อยละ 4.44

จำนวนพนักงาน พบว่าส่วนใหญ่กิจการมีจำนวนพนักงาน 11-15 คน และมากกว่า 20 คน จำนวน 13 ราย คิดเป็นร้อยละ 28.89 ถัดมา มีพนักงาน 6-10 คน จำนวน 10 ราย คิดเป็นร้อยละ 22.22 มีพนักงาน 16-20 คน จำนวน 7 ราย คิดเป็นร้อยละ 15.56 และมีพนักงานไม่เกิน 5 คน จำนวน 2 ราย คิดเป็นร้อยละ 4.44

การกระจายตัวของข้อมูลประชากร (μ, σ) ของข้อมูลความเห็นโดยรวมในด้านสภาพแวดล้อมทางธุรกิจและประเด็นการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่า การจัดอันดับ และระดับของความคิดเห็น

Table 1 Parameter estimates classified by wood requirement from forest plantation of wood industry entrepreneurs in sa kaeo province.

N=45

Descriptions	μ	σ	Rank	Agreement
1. Wood characteristics	4.10	0.38	3	Agree
2. Supplier	4.21	0.34	1	Agree
3. Duration	4.03	0.54	4	Agree
4. Quantity	4.10	0.74	2	Agree
Total	3.84	0.30		Agree

Table 2 Parameter estimates classified by business of environment from forest plantation of wood industry entrepreneurs in Sa Kaeo province

(N=45)

Descriptions	μ	σ	Rank	Agreement
1. Organization structure and Services	3.48	0.70	4	Undecided
2. Strategies and Marketing	3.23	0.67	6	Undecided
3. Economics	3.99	0.58	3	Agree
4. Social	4.01	0.60	2	Agree
5. Politic and Law	4.29	0.34	1	Agree
6. Technology	3.34	1.08	5	Undecided
Total	3.84	0.30		Agree

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (ρ)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (ρ) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมทางธุรกิจกับการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่าตาม พระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ จังหวัดสระแก้ว กำหนดตัวแปรดังนี้

การตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่า

ด้านคุณลักษณะ (X1) ด้านผู้ขาย (X2)

ด้านเวลา (X3) ด้านปริมาณ (X4)

สภาพแวดล้อมทางธุรกิจ

ด้านโครงสร้างองค์กร (Y1) ด้านกลยุทธ์ของกิจการ (Y2)

ด้านเศรษฐกิจ (Y3) ด้านสังคม (Y4)

ด้านกฎหมายและการเมือง (Y5) ด้านเทคโนโลยี (Y6)

ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมทางธุรกิจกับการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่าตาม พระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ จังหวัดสระแก้ว พบว่า สภาพแวดล้อมทางธุรกิจด้านสังคม มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่า ในด้านคุณลักษณะ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) เท่ากับ 0.32 สภาพแวดล้อมทางธุรกิจด้านเทคโนโลยีมีความสัมพันธ์กับการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่า ในประเด็นด้านเวลา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) เท่ากับ 0.37 หมายความว่า มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกในระดับปานกลาง โดยข้อมูลจากการวิเคราะห์แสดงใน Table 3

Table 3 Pearson's Population Correlation Coefficients (ρ) for the relation of business environment and wood requirement decision.

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
X1	0.11	0.28	0.20	0.32*	0.13	0.10
	0.47	0.07	0.53	0.03	0.38	0.51
X2	-0.17	0.09	-0.02	0.10	-0.02	-0.02
	0.26	0.56	0.89	0.52	0.91	0.01
X3	-0.09	0.00	0.11	0.22	0.02	0.37*
	0.55	1.00	0.48	0.15	0.91	0.01
X4	-0.29	-0.14	-0.08	0.11	0.03	0.02
	0.06	0.35	0.62	0.49	0.84	0.90

* $p<0.05$

สรุป

1. กิจการอุตสาหกรรมไม้ในจังหวัดสระแก้ว มีทำเลที่ตั้งในท้องที่อำเภอเมืองสระแก้ว เป็นส่วนใหญ่ อาจด้วยความสะดวกในการขนส่งสินค้าและจัดจำหน่ายภายในอำเภอเมืองสระแก้ว ที่อยู่กึ่งกลางจังหวัด สะดวกต่อการคมนาคมไปยังจังหวัดใกล้เคียง ขนาดของกิจการที่สำรวจไม่ใหญ่มากนัก มักประกอบการในรูปแบบบุคคลธรรมดา บางแห่งเป็นกิจการภายในครัวเรือน ใช้เงินลงทุนไม่มาก และใช้วัตถุดิบในการผลิตจากแหล่งไม้ภายในจังหวัด

2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตอบสนองความต้องการไม้ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ ในแต่ละประเด็นมีระดับความต้องการอยู่ในเกณฑ์ มาก ทุกประเด็น โดยเมื่อจัดลำดับแล้ว พบว่า ประเด็นด้านผู้ขาย มีค่าเฉลี่ยของประชากรมากที่สุด

สภาพแวดล้อมทางธุรกิจที่มีผลต่อความต้องการไม้ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ ในแต่ละปัจจัย มีระดับความต้องการหลายระดับแตกต่างกัน โดยระดับมาก ได้แก่ ด้านกฎหมายการเมือง ด้านสังคม และด้านเศรษฐกิจ ระดับปานกลาง ได้แก่ ด้านโครงสร้างองค์กรและลักษณะของธุรกิจ ด้านเทคโนโลยี และด้านกลยุทธ์ของกิจการ ลักษณะการตลาด อยู่ในระดับปานกลาง โดยเมื่อจัดลำดับแล้ว พบว่า สภาพแวดล้อมทางธุรกิจด้านกฎหมายและการเมือง มีค่าเฉลี่ยของประชากรมากที่สุด เห็นได้ว่าประเด็นด้านผู้ขาย มีผลต่อความต้องการไม้ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้มากที่สุด อาจเนื่องมาจาก ผู้ซื้อ เน้นที่จะพิจารณา ความน่าเชื่อถือ ชื่อเสียงของผู้ขาย ความสะดวกในการติดต่อซื้อขาย ราคา การโฆษณาส่งเสริมการขาย และการได้เห็นตัวอย่างสินค้า เป็นสำคัญกว่าประเด็นอื่นๆ และสภาพแวดล้อมทางธุรกิจ ด้านกฎหมาย การเมือง มีผลต่อความต้องการไม้ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้มากที่สุด อาจเนื่องมาจาก ผู้ซื้อเห็นว่ากฎหมายบ้านเมืองต่างๆ อาทิ กฎหมายป่าไม้ กฎหมายสวนป่า กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับกิจการ กฎหมายแรงงาน กฎหมายโรงงาน ส่งผลต่อกิจการอย่างมาก และการถูกควบคุมให้ใช้วัตถุดิบที่ได้รับการรับรองแหล่งที่มาอย่างถูกระเบียบกฎหมายเคร่งครัด ก็ส่งผลต่อการตัดสินใจเช่นเดียวกัน อาจกล่าวได้ว่า กฎหมายพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 เป็นกฎหมายที่มีประสิทธิภาพและส่งผลต่อการดำเนินการด้านสวนป่าเป็นอย่างยิ่ง

3. การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (ρ) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมทางธุรกิจกับการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่า ตามพระราชบัญญัติสวนป่า (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2558 ของผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ จังหวัดสระแก้ว พบว่า

3.1 สภาพแวดล้อมทางธุรกิจด้านสังคม มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่าในประเด็นด้านคุณลักษณะของไม้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) เท่ากับ 0.32 หมายความว่า มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกในระดับปานกลาง แสดงว่า ผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้เชื่อว่าสังคมให้ความเชื่อมั่นในคุณภาพของไม้ที่ได้มาจากการทำสวนป่า ยอมรับนับถือต่อภาพลักษณ์ที่ดีของผู้ใช้ผลิตภัณฑ์จากไม้ ยอมรับว่ากิจการอุตสาหกรรมไม้ใช้ไม้จากการทำสวนป่าเป็นวัตถุดิบในการผลิต และผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้จะตัดสินใจเลือกโดยคำนึงถึงคุณลักษณะของไม้ ในด้านชนิด คุณภาพไม้ รวมทั้งหลักฐานการรับรองแหล่งที่มาของไม้ที่ได้มาจากการทำสวนป่าที่เป็นวัตถุดิบตามไปด้วย

3.2 สภาพแวดล้อมทางธุรกิจด้านเทคโนโลยีมีความสัมพันธ์กับการตอบสนองของผู้ซื้อไม้จากสวนป่า ในประเด็นด้านเวลา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) เท่ากับ 0.37 หมายความว่า มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกในระดับปานกลาง แสดงว่า ผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้เห็นว่าการพัฒนาเทคโนโลยีของเครื่องจักรในการผลิต และเทคโนโลยีการขนส่งเคลื่อนย้ายวัตถุดิบที่มีประสิทธิภาพดี ผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้จะตัดสินใจเลือกโดยคำนึงถึงระยะเวลาในการขนส่งวัตถุดิบ ความสะดวกในการเคลื่อนย้ายเครื่องจักรเข้าสู่พื้นที่หรือแรงงานสำหรับตัดฟัน เส้นทางขนส่งที่สะดวก ฤดูกาลที่เหมาะสมต่อการดำเนินงานตามไปด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.จงรัก วัชรินทร์รัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผศ.ดร.นิคม แหลมสัก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดสระแก้ว และผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมไม้ในจังหวัดสระแก้วทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

กรมป่าไม้. 2560. **ข้อมูลสถิติกรมป่าไม้ปี 2559.** กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

ไพโรจน์ สันป่าเป้า. 2553. **ปัจจัยที่มีผลต่อความต้องการใช้ไม้สักจากสวนป่าองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ของอุตสาหกรรมไม้ในจังหวัดแพร่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญชม ศรีสะอาด และบุญส่ง นิลแก้ว. 2535. การอ้างอิงประชากรเมื่อใช้เครื่องแบบมาตราส่วนประมาณค่ากับกลุ่มตัวอย่าง. **วารสารการวัดผลการศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มหาสารคาม.** 3(1): 22-24

วุฒิพล หัวเมืองแก้ว. 2528. **เศรษฐศาสตร์ป่าไม้**. ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศศิวิมล สุขบท. 2547. **การตลาดระหว่างประเทศ**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

สุทิน ชนะบุญ. 2560. **สถิติและการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยด้านสุขภาพเบื้องต้น.** กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี.

สุนีย์ เหมะประสิทธิ์. 2536. **สถิติประยุกต์เพื่อการวิจัย.** โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพ.

สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดสระแก้ว. 2560. **รายงานสรุปผลการดำเนินงานประจำปีงบประมาณ 2560.**

การบำบัดโครเมียมในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยการดูดซับด้วยไบโอชาร์แม่เหล็ก

Treatment of Chromium in Electroplating Wastewater using Magnetic Biochar Adsorption

พิเศษ กึกสูงเนิน[1] และ ชลอ จารุสุทธิรักษ์[1*]

Piset Kuksungnoen[1] and Chalor Jarusutthirak[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยไบโอชาร์แม่เหล็ก ที่เตรียมจากเปลือกทุเรียน โดยทำการเผาแบบไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 700° 0C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เป็นไบโอชาร์แม่เหล็ก (magnetic biochar) โดยการเติม $FeCl_3$ และ $FeSO_4$ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณไบโอชาร์ และระยะเวลาการดูดซับ ทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็ก ผลการทดลองพบว่า ที่สภาวะเหมาะสมได้แก่ ค่าพีเอช 3 เวลา 30 นาที ปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็ก 40 g/L มีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม %64.28ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ โดยมีค่าการดูดซับสูงสุด(Q_{max}) 4.49mg/g การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็กในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็กมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากสารละลายเหล็กที่เคลือบบนผิวไบโอชาร์แม่เหล็กทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับโครเมียมลดลง อย่างไรก็ตามไบโอชาร์แม่เหล็กมีความสามารถในการตกตะกอนได้ดีจึงแยกตัวจากน้ำเสียได้ดีกว่า

ABSTRACT

This research aimed to investigate the performance of magnetic biochar on adsorption of chromium in electroplating wastewater. Biochar was prepared from durian bark via pyrolysis at 700°c for 2 hours. Then the biochar was modified to be a magnetic biochar using $FeCl_3$ and $FeSO_4$. Factors affecting the efficacy of biochar adsorption including pH, biochar dosage, and contact time, were investigated. Adsorption isotherms of chromium with magnetic biochar were analyzed. The results showed that at an optimum pH of 3, contact time of 60 min, and magnetic biochar dosage of 40 g/L, the removal efficiency of Cr was 64.28%. Adsorption isotherm of Cr on magnetic biochar followed Langmuir isotherm with a maximum removal capacity (Q_{max}) of 4.49 mg/g. The comparison of chromium removal efficiency between biochar and magnetic biochar in electroplating wastewater revealed that the removal efficiency using magnetic biochar was lower than that of biochar because iron species occupied the porous of magnetic biochar, leading to a reduction of adsorption capacity. However, magnetic biochar exhibited better settling performance compared to biochar.

Key words: adsorption, biochar, isotherms, magnetic biochar

* Corresponding author; e-mail address: ecclj@ku.ac.th

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

น้ำเสียอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นจากโรงงานชุบโลหะ มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น โครเมียม (chromium; Cr) สังกะสี (zinc; Zn) ทองแดง (copper; Cu) แคดเมียม (cadmium; Cd) และตะกั่ว (lead; Pb) เป็นต้น ซึ่งโครเมียมในโรงงานชุบโลหะมีการใช้งานอยู่ 2 รูปของเลขออกซิเดชัน ได้แก่ โครเมียมไตรวาเลนต์ (Cr(III)) และ โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr(VI)) ซึ่งพบว่า โครเมียม (VI) มีอันตรายมากกว่าโครเมียม (III) เมื่อเกิดการปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อม อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอย่างรุนแรง การได้รับโครเมียม (VI) ปริมาณมากในมนุษย์อาจทำให้เกิดการกลายพันธุ์ และเป็นสารก่อมะเร็ง (Choudhary and Paul, 2018) จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม โดยกำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับโครเมียม (VI) ไม่เกิน 0.25 mg/L และโครเมียม (III) ไม่เกิน 0.75 mg/L (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2560)

การบำบัดโครเมียมในน้ำเสียมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน และการกรองผ่านเมมเบรน เป็นต้น แม้ว่าวิธีการดังกล่าวสามารถบำบัดโครเมียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ดูแลรักษายาก และค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นหากสามารถใช้วิธีการบำบัดที่มีประสิทธิภาพ และสามารถลดค่าใช้จ่าย โดยเฉพาะหากสามารถนำวัตถุดิบเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ก็จะเป็นการลดต้นทุนได้อีกทางหนึ่ง การดูดซับด้วยไบโอชาร์ (Biochar) เป็นอีกหนึ่งทางเลือก เนื่องจากไบโอชาร์ทำมาจากวัสดุเหลือใช้ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ทำให้ลักษณะของไบโอชาร์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนจำนวนมาก (Mohan *et al.*, 2011) งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าไบโอชาร์สามารถใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักชนิดต่างๆ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียมได้ (Karunanayake *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2014) ไบโอชาร์สามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ต่างๆ เช่น ไม้ไผ่และเปลือกสับปะรด เป็นต้น ในประเทศไทยมีการค้าขายผลไม้เป็นจำนวนมาก ทำให้เปลือกผลไม้ที่เหลือกลายเป็นวัสดุเหลือใช้ หนึ่งในนั้นคือเปลือกทุเรียนซึ่งทุเรียนเป็นผลไม้ที่มีปริมาณการบริโภคในประเทศสูง และมีการส่งออกเนื้อทุเรียนเป็นจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้จึงนำเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาทำเป็นไบโอชาร์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากไบโอชาร์เป็นผงขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบาทำให้คัดแยกจากน้ำเสียหลังการบำบัดได้ยาก จึงมีการพัฒนาไบโอชาร์ให้มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก ซึ่งสามารถทำการแยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายโดยการแยกด้วยแม่เหล็ก พบว่าสามารถแยกไบโอชาร์ออกจากน้ำเสียได้เร็วและมีประสิทธิภาพกว่าการตกตะกอนหรือปั่นเหวี่ยง (Wang *et al.*, 2014)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็กที่เตรียมจากเปลือกทุเรียน โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณไบโอชาร์ และ เวลา นอกจากนี้ยังศึกษาแบบจำลองไอโซเทอร์มของการดูดซับ เพื่ออธิบายกลไกของการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็ก รวมทั้งศึกษาความสามารถในการแยกไบโอชาร์แม่เหล็กด้วยสนามแม่เหล็กจากน้ำเสียหลังการบำบัด ผลการวิจัยสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาตัวดูดซับจากวัสดุธรรมชาติเพื่อการบำบัดสารมลพิษในน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็ก

ไบโอชาร์ที่ใช้ในการทดลองเตรียมจากเปลือกทุเรียนโดยตากให้แห้งและสับให้มีขนาดประมาณ 4×4 cm^2 จากนั้นนำเข้าตู้อบอุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำการเผาด้วยวิธีไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 700°C เป็น

เวลา 2 ชั่วโมง การเตรียมไบโอชาร์แม่เหล็กทำโดยแช่ไบโอชาร์ 20 g ในน้ำปราศจากไอออน (DI) 200 mL และเติมสารละลายที่เตรียมจากเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) 20 g และเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) 11.1 g ในน้ำ DI 600 mL ปั่นกวน 20 นาที จากนั้นเติม 10M NaOH จนค่า pH เป็น 10-11 ปั่นกวน 1 ชั่วโมง และต้ม 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยเอทานอลและน้ำ DI ก่อนนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Wang *et al*., 2014)

ตัวอย่างน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเตรียมโดยละลายโพแทสเซียมไดโครเมตด้วยน้ำ DI และ น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดด้วยเครื่อง atomic absorption spectrometer (AAS)

การทดลองการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็ก

1. การทดลองการดูดซับเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 150 mg/L ปริมาตร 100 mL โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่ 1 พีเอชที่ต่างกัน 4 ระดับ (2, 3, 4 และ 6) ปัจจัยที่ 2 ปริมาณไบโอชาร์ (10, 20, 30 และ 40 g/L) และ ปัจจัยที่ 3 ระยะเวลาในการดูดซับ (15, 30, 60, 120 และ 180 นาที) ปรับพีเอชของสารละลายด้วย 0.1 M HCl หรือ 0.1 M NaOH และเขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที (rpm) เก็บตัวอย่างตามระยะเวลาที่กำหนดได้แก่ 15 30 60 120 180 นาที และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่เหลือในสารละลายตัวอย่างด้วยเครื่อง AAS

2. การทดลองการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็กใช้น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ปริมาตร 100 mL กำหนดปัจจัยควบคุม ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณตัวดูดซับ และระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้างต้น เขย่าด้วยความเร็ว 120 rpm นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดด้วยเครื่อง AAS

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโครเมียมเข้มข้น 150 mg/L ปริมาตร 100 mL ค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น แปรค่าปริมาณไบโอชาร์ที่ 10 20 30 40 g/L เขย่าสารด้วยความเร็ว 120 rpm ตามเวลาที่เหมาะสม จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดด้วยเครื่อง AAS คำนวณค่าปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็กได้จากสมการที่ (1) ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และ ฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ด้วยสมการเส้นตรง (2) และ (3) ตามลำดับ

$$q_e = (C_0 - \frac{C_e}{W}) \times V \qquad (1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับ (mg/g) C_0 คือ ความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้น (mg/L) C_e คือ ความเข้มข้นของโครเมียมที่สภาวะสมดุล (mg/L) V คือ ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการดูดซับ (L) และ W คือ น้ำหนักไบโอชาร์แม่เหล็กที่ใช้การดูดซับ (g)

$$\frac{C_e}{q_e} = \left(\frac{C_e}{q_m}\right) + \left(\frac{1}{K_L q_m}\right) \qquad (2)$$

เมื่อ C_e คือความเข้มข้นของโครเมียมที่ภาวะสมดุล (mg/L) q_e คือปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็ก (mg/g) q_m คือปริมาณการดูดซับสูงสุด (mg/g) และ K_L คือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3)$$

เมื่อ q_e คือปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็ก (mg/g) C_e คือความเข้มข้นของโครเมียมที่สภาวะสมดุล (mg/L) K_F คือค่าคงที่ของฟรุนดลิช และ n คือค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็ก

การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมดังแสดงใน Figure 1 พบว่า พีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมของไบโอชาร์แม่เหล็ก โดยที่พีเอชเท่ากับ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดถึงร้อยละ 94.26 การเพิ่มค่าพีเอชส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงอย่างรวดเร็วและคงที่ที่พีเอช 4-6 ทั้งนี้เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อรูปแบบสปีชีส์ของโครเมียมโดยที่พีเอช 2–3 Cr(VI) อยู่ในรูป $H_2Cr_2O_7$ เมื่อเพิ่มพีเอชโครเมียม (VI) จะอยู่ในรูป $Cr_2O_7^{2-}$ (Yuan *et al*., 2009) ในขณะเดียวกันการเพิ่มค่าพีเอชทำให้มีความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ (OH^-) เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลในการแย่งชิงตำแหน่งดูดซับของโครเมียม (VI) ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมลดลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าที่พีเอช 2 จะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดแต่พบว่ามีสารประกอบของเหล็กหลุดออกมาในสารละลายทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพลดลงทั้งในด้านปริมาณเหล็ก สี ความขุ่น และความสามารถในการตกตะกอน ดังนั้นจึงเลือกค่าพีเอช 3 สำหรับการทดลองต่อไป

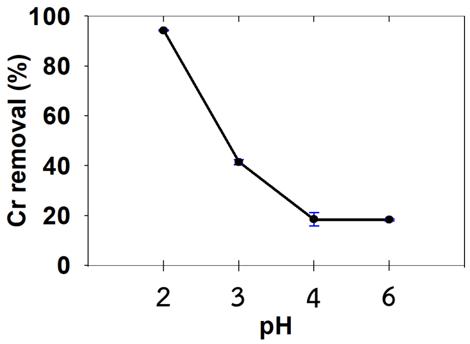


Figure 1 Effect of pH on chromium adsorption by magnetic biochar ([Cr]=150 mg/L, magnetic biochar dosage=20 g/L, adsorption time=180 min).

ผลของปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็กต่อประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม

การศึกษาผลของปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็กต่อประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมแสดงใน Figure 2 พบว่าการเพิ่มปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็กทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็กทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมจึงสูงขึ้น โดยที่ปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็ก 10 20 30 และ 40 g/L ให้ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมร้อยละ 21.95 41.46 55.50 และ 65.61 ตามลำดับ ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al*. (2014) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพ

การบำบัดโครเมียมมีแนวโน้มสูงขึ้นได้อีกหากมีการเพิ่มปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็ก ในการทดลองขั้นต่อไปเลือกใช้ปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็ก 40 g/L

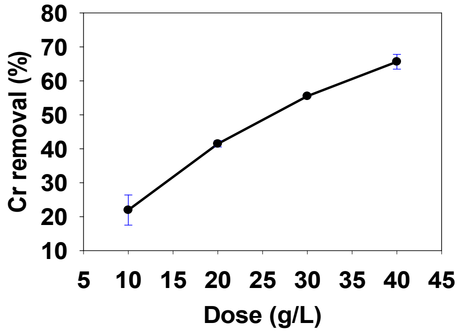


Figure 2 Effect of magnetic biochar dosage on chromium adsorption ([Cr]=150 mg/L, pH=3, adsorption time=180 min).

ผลของเวลาต่อการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็ก

การศึกษาผลของระยะเวลาต่อประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม ได้ผลการทดลองแสดงใน Figure 3 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ ไบโอชาร์แม่เหล็กยังมีพื้นที่ผิวว่างมากพอสำหรับดูดซับโครเมียม ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลานานขึ้น จนที่เวลา 60 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดเริ่มคงที่ เนื่องจากการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมที่ระยะเวลา 15 30 60 120 และ 180 นาที มีค่าร้อยละ 13.78 41.21 64.28 64.66 และ 65.61 ตามลำดับ จึงเลือกเวลาที่ 60 นาที เป็นระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสม ผลการวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al.* (2014) อย่างไรก็ตามการดูดซับอาจเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงระยะเวลา 30 -60 นาที ซึ่งในการทดลองนี้ไม่ได้ทำการศึกษาไว้ จึงควรกำหนดช่วงเวลาที่ละเอียดมากขึ้นในช่วง 30-60 นาที

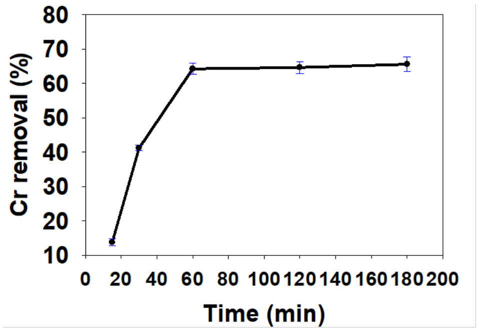


Figure 3 Effect of reaction time on chromium adsorption ([Cr]=150 mg/L, pH=3, magnetic biochar dosage=40 g/L).

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมของไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็ก

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็ก ใช้สารละลายโครเมียมเข้มข้น 150 mg/L ปริมาณไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็ก 20 g/L เขย่าสารด้วยความเร็ว 120 rpmเป็นเวลา 60 นาที และปรับค่าพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 2-6 ผลการทดลองแสดงใน Figure 4 พบว่าที่พีเอช 2 ประสิทธิภาพการดูดซับของไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกัน คือร้อยละ 94.26 และ 95.33 ตามลำดับ เนื่องจากที่พีเอช 2 สารประกอบของเหล็กในไบโอชาร์แม่เหล็กหลุดออกมาในสารละลายทำให้ไบโอชาร์แม่เหล็กมีพื้นที่ผิวในการดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับไบโอชาร์ ที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 3 ขึ้นไป

ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์มีค่าสูงกว่าไบโอชาร์แม่เหล็ก เพราะพื้นที่ผิวของการดูดซับของไบโอชาร์แม่เหล็กมีอนุภาคเหล็กเกาะติดที่พื้นผิว ทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับดูดซับโครเมียมน้อยกว่าไบโอชาร์ธรรมดา อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเร็วและประสิทธิภาพของการตกตะกอนพบว่าไบโอชาร์แม่เหล็กตกตะกอนได้ดีและเร็วกว่าไบโอชาร์ธรรมดาโดยสามารถแยกจากสารละลายได้ทันทีเมื่อใช้แม่เหล็กดูด ดังแสดงใน Figure 5

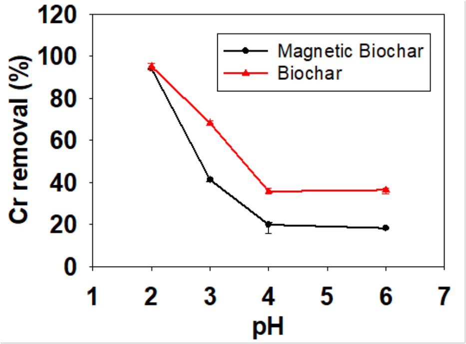


Figure 4 Comparison of chromium removal efficiency between biochar and magnetic biochar ([Cr]=150 mg/L, magnetic biochar dosage=20 g/L, adsorption time=60 min).

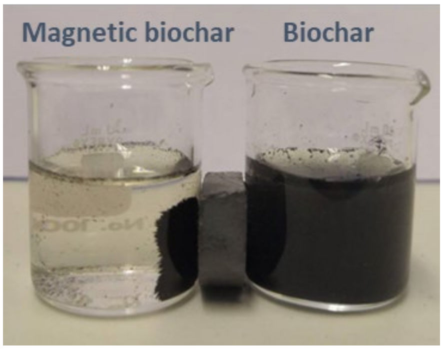


Figure 5 Settling performance of biochar and magnetic biochar.

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็ก

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็กที่สภาวะเหมาะสม ได้แก่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม 150 mg/L ค่าพีเอช 3 แปรค่าปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็ก 10 20 30 และ 40 g/L เขย่าด้วยความเร็ว 120 rpm เป็นเวลา 60 นาที ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการเส้นตรงการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิชแสดงใน Table 1 พบว่า การดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็กเป็นไปตามหลักการของแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็กเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) โดยมีค่าคงที่ของแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.48 L/mg และค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_{max})เท่ากับ 4.49 mg/g สอดคล้องกับงานวิจัยของ Choudhary and Paul (2018)

Table 1 Adsorption isotherms of chromium adsorption by magnetic biochar.

Langmuir			Freundlich		
Q_{max} (mg/g)	K_L(L/mg)	R^2	K_f (mg/g)/(mg/L)^n	1/n	R^2
4.49	0.48	0.997	0.6	0.35	0.972

การดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็ก

ผลการทดลองการบำบัดโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็กแสดงใน Figure 6 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็กมีค่าร้อยละ 64.77 และ 37.11 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ศึกษาในน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีค่าความเข้มข้นของโครเมียมสูงกว่า รวมทั้งมีการปนเปื้อนของสารประกอบอื่นๆ นอกเหนือจากโครเมียม เช่น นิกเกิล (II) ทองแดง (II) เป็นต้น ซึ่งไม่ได้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียไว้ในงานวิจัยนี้ ไอออนของสารประกอบเหล่านี้อาจแย่งพื้นที่ผิวของการดูดซับกับโครเมียมได้ (Lv *et al*., 2013) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับทั้งสอง พบว่า ไบโอชาร์แม่เหล็กมีค่าการบำบัดต่ำกว่าไบโอชาร์ธรรมดา ซึ่งเกิดจากอนุภาคเหล็กที่เกาะติดที่พื้นผิวไบโอชาร์แม่เหล็กมีทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับดูดซับโครเมียมน้อยกว่าไบโอชาร์

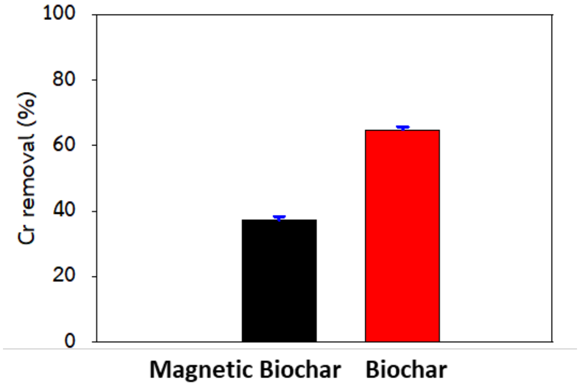


Figure 6 Performance of biochar and magnetic biochar on removal of chromium from electroplating wastewater ([Cr]=211 mg/L, pH=2.95, adsorbent dosage=40 g/L, adsorption time=60 min)

สรุป

ไบโอชาร์แม่เหล็กที่เตรียมจากเปลือกทุเรียนโดยทำการเผาแบบไพโรไลซิสและการเติม $FeCl_3$ และ $FeSO_4$ สามารถใช้ในการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียโรงงานชุบโลหะได้ โดยที่สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ปริมาณไบโอชาร์แม่เหล็ก 40g/L และเวลาบำบัด 60 นาที สามารถบำบัดโครเมียมได้ร้อยละ 64.28 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็ก พบว่าไบโอชาร์แม่เหล็กให้ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมต่ำกว่าไบโอชาร์ธรรมดา เนื่องจากอนุภาคเหล็กที่เกาะติดที่พื้นผิวไบโอชาร์แม่เหล็กมีทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับดูดซับโครเมียมน้อยกว่าไบโอชาร์ธรรมดา อย่างไรก็ตามไบโอชาร์แม่เหล็กสามารถตกตะกอนได้ดีและเร็วกว่าไบโอชาร์ธรรมดา สามารถแยกจากสารละลายได้ทันทีเมื่อใช้แม่เหล็กดูด การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับพบว่าการดูดซับโครเมียมด้วยไบโอชาร์แม่เหล็กเป็นไปตามหลักการของแลงเมียร์ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีค่าคงที่การดูดซับแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.48L/mg และค่าการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) เท่ากับ 4.49 mg/g การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่า ไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็กสามารถดูดซับโครเมียมได้ร้อยละ 37.11 และ 64.77 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีสารปนเปื้อนอื่นๆ ที่มีโอกาสแย่งพื้นที่ของการดูดซับได้ ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรทำการศึกษาผลร่วมของไอออนต่างๆ ในสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับด้วยไบโอชาร์และไบโอชาร์แม่เหล็ก รวมทั้งแนวทางการนำไป

โอชาร์แม่เหล็กกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และแนวทางการกำจัดอย่างเหมาะสมเพื่อลดผลกระทบของมลพิษจากโลหะหนักต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อมและกองทุนคณะสิ่งแวดล้อม สำหรับทุนสนับสนุนการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2560. **ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560**, จาก https://www.diw.go.th/hawk/news/11.PDF, 30 ธันวาคม 2562.

Choudhary, B. and D. Paul. 2018. Isotherms, kinetics and thermodynamics of hexavalent chromiumremoval using biochar. **Journal of Environmental Chemical Engineering** 6: 2335–2343.

Karunanayake, A. G., O.A. Todd, M. Crowley, L. Ricchetti, C. Pittman, R. Anderson, D. Mohan and T. Mlsna. 2018. Lead and cadmium remediation using magnetized and nonmagnetized biochar from *Douglas fir*. **Chemical Engineering Journal** 331: 480-491.

Lv, X., Y. Hu, J. Tang, T. Sheng, G. Jiang and X. Xu. 2013. Effects of co-existing ions and natural organic matter on removal of chromium (VI) from aqueous solution by nanoscale zero valent iron (nZVI)-Fe_3O_4 nanocomposites. **Chemical Engineering Journal** 218: 55-64.

Mohan, D., S. Rajput, V.K. Singh, P.H. Steele and C. Pittman. 2011. Modeling and evaluation of chromium remediation from water using low cost biochar, a green adsorbent. **Journal of Hazardous Materials** 188: 319-333.

Wang, S., H.F. Li, K. Li, Z.Q. Gu, Y.K. Tang and Y.Y. Mo. 2014. Combined performance of biochar sorption and magnetic separation processes for treatment of chromium- contained electroplating wastewater. **Bioresource Technology** 174: 67-73.

Yuan, P., M. Fan, D. Yang, H. He, D. Liu, A. Yuan, J. Zhu and T. Chen. 2009. Montmorillonite-supported magnetite nanoparticles for the removal of hexavalent chromium [Cr (VI)]from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials** 166, 821–829.

Zhou, N., H. Chen, J. Xi, D. Yao, Z. Zhou, Y. Tian and X. Lu. 2017. Biochars with excellent Pb(II) adsorption property produced from fresh and dehydrated banana peels via hydrothermal carbonization. **Bioresource Technology** 232: 204-210.

ความสัมพันธ์ระหว่างชีพลักษณ์และสัตว์กินผลไม้ ในป่าผสมผลัดใบ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง จังหวัดอุทัยธานี

Relationships between Plant Phenology and Frugivores in Mixed Deciduous Forest, Huai Kha Khaeng Wildlife Sanctuary, Uthai Thani Province

นรากร โตจิต[1*] วิจักขณ์ ฉิมโฉม[1] ฉัตรชัย เงินแสงสรวย[2] และ พิไล พูลสวัสดิ์[3]

Narakorn Tojit[1*], Vijak Chimchome[1] , Chatchai Ngernsaengsaruay[2] and Pilai Poonswad[3]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดและชีพลักษณ์ของพรรณไม้ รวมถึงการใช้ประโยชน์ของสัตว์กินผลไม้ในช่วงออกผล ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2560 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 ในพื้นที่แปลงถาวรขนาด 1 เฮกตาร์ จำนวน 3 แปลง ทำการสำรวจเดือนละ 1 ครั้ง พบพรรณไม้ทั้งหมด 1,927 ต้น 20 วงศ์ 29 สกุล และ 34 ชนิด พรรณไม้ที่ออกดอกและออกผลในช่วงเวลาที่ทำการศึกษามีจำนวน 17 ชนิดและเป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้ทั้งหมด 12 ชนิด สามารถแบ่งกลุ่มตามลักษณะผล คือ ขนาดผล ชนิดผล และสีผล จากการสังเกตสัตว์กินผลไม้พบสัตว์ทั้งหมด 32 ชนิด แบ่งเป็นสัตว์กลุ่มนก 22 ชนิด และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 10 ชนิด เมื่อพิจารณาตามลักษณะผลพบว่า สัตว์เลือกกินผลขนาดเล็กมากที่สุด (ร้อยละ 41.7) เลือกกินชนิดผลแบบมะเดื่อมากที่สุด (ร้อยละ 33.3) และเลือกกินผลที่มีสีม่วง-ดำมากที่สุด (ร้อยละ 25) ซึ่งเป็นผลของต้นไม้กลุ่มไทร (Fig trees) เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของสัตว์ป่า จัดได้ว่าเป็นชนิดพันธุ์แกนหลักของระบบนิเวศ (Keystone species)

ABSTRACT

This study aimed to identify species and plant phenology. Including the utilization by frugivores inside three 1 ha permanent plot in mixed deciduous forest are being conducted from January 2017-February 2018. All recorded trees, total 1,927 individuals, from 20 families, 29 genera and 34 species. There were 17 species provided flowers and fruits, and 12 of the fruit species seemed to be eaten by frugivores (35.3%). According to the fruit characteristic (size, type and color). Observation were conducted thirty-two species of frugivores were recorded. Of these, 22 birds and 10 mammals. Considering on fruiting plant - frugivores traits, preferred the small fruits (41.7%) than other size, fruit types as syconium and fruit colors is purple-black were most favorite used, 33.3% and 25%, respectively. The results suggested that fig trees are important diet species and could be the keystone species.

Key words: fruit characteristics, frugivory, camera trapping, direct observation

* Corresponding author; e-mail address: Narakorn.to@ku.ac.th

[1]ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Forest Biology, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2] ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Botany, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

[3] มูลนิธิศึกษาวิจัยนกเงือก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ 10400

[3] Thailand Hornbill Project, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok 10400

คำนำ

เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้งเป็นส่วนหนึ่งในเขตพื้นที่อนุรักษ์ที่ได้รับการประกาศขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลกทางธรรมชาติ จากองค์การศึกษาวิทยาศาสตร์และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – UNESCO) ประกอบด้วยป่าหลากหลายชนิด ทำให้เป็นพื้นที่ที่มีความหลากหลายทางชีวภาพสูงสุดแห่งหนึ่งของประเทศไทย ชนิดป่าหนึ่งในนั้นคือ ป่าผสมผลัดใบ (Mixed deciduous forest) หรือเรียกอีกชื่อว่า ป่าเบญจพรรณ พบทุกภาคของประเทศไทย ยกเว้นภาคใต้ (ดอกรัก และ อุทิศ, 2552) มีลักษณะเด่นคือ ต้นไม้เกือบทั้งหมดมีการผลัดใบในฤดูแล้ง มักพบไผ่ขึ้นผสมอยู่กับไม้เรือนยอดชั้นกลาง ตั้งแต่ระดับความสูง 50 เมตร จนถึง 800 เมตร จากระดับน้ำทะเล มีปริมาณน้ำฝนประมาณ 1,200-1,400 มิลลิเมตรต่อปี นับว่าเป็นป่าที่มีลักษณะโครงสร้างที่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตทั้งพรรณไม้และสัตว์ป่า พรรณไม้ที่เป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้ (frugivores) ในป่าผสมผลัดใบ มีอยู่หลากหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีลักษณะการดึงดูดภายนอกที่แตกต่างกัน เช่น สีผล ขนาดผล กลิ่น ชนิดผล และขนาดผล เป็นต้น อาจรวมไปถึงธาตุอาหารที่จำเป็นต่อสัตว์ป่าด้วย สัตว์กินผลไม้จะเข้ามาใช้ประโยชน์จากต้นที่มีผลสุกเป็นอาหาร เป็นการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันของสิ่งมีชีวิต (species interactions) ลักษณะเหล่านี้เป็นการวิวัฒนาการและการปรับตัวร่วมกันของพรรณไม้และสัตว์กินผลไม้ สัตว์ได้ประโยชน์จากการกินผลไม้เป็นอาหาร พรรณไม้ได้ประโยชน์จากสัตว์กินผลไม้ในการช่วยกระจายเมล็ดพันธุ์ (seed dispersal)

การศึกษาพรรณไม้และสัตว์กินผลไม้ในป่าผสมผลัดใบในพื้นที่นี้ยังมีรายงานอยู่น้อยมาก วัตถุประสงค์ในการศึกษานี้เพื่อศึกษาชนิดและชีพลักษณ์ของพรรณไม้ที่เป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้ในป่าผสมผลัดใบ ทำให้ทราบถึงช่วงเวลาการออกดอกออกผลของพรรณไม้ในรอบปี (phenology) และการใช้ประโยชน์ของสัตว์กินผลไม้ในช่วงออกผล โดยการบันทึกภาพจากกล้องดักถ่ายภาพ (camera traps) และการสังเกตโดยตรง (direct observation) สำหรับเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อนำไปใช้ในการจัดการทรัพยากรธรรมชาติของป่าผสมผลัดใบต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ ศึกษาสังคมพืชในแปลงขนาดพื้นที่ 1 เฮกตาร์ (100x100 เมตร) เลือกพื้นที่ที่เป็นตัวแทนของสังคมพืชป่าผสมผลัดใบ จำนวน 3 แปลง มีลักษณะคล้ายคลึงกันบริเวณริมน้ำและเป็นพื้นที่ใกล้เคียงแหล่งทำรังในช่วงฤดูผสมพันธุ์ (breeding season) ของนกเงือกกรามช้างปากเรียบ (*Rhyticeros subruficollis*) ในการวางแปลงนั้นใช้หลักการวางแปลงถาวรของ ดวงใจ และคณะ (2558) จำแนกชนิดพรรณไม้และติดแผ่นอลูมิเนียมหมายเลขประจำต้น เฉพาะขนาดพรรณไม้ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก (DBH)$\geq$4.5 เซนติเมตร เพื่อติดตามการออกดอกออกผลในระยะยาว และบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝน

ชีพลักษณ์ของพรรณไม้

บันทึกชีพลักษณ์ของพรรณไม้ในแปลงเฉพาะไม้ต้นที่ติดแผ่นอะลูมิเนียม โดยบันทึกตามลักษณะชีพลักษณ์ เดือนละ 1 ครั้ง เริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2560-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 เมื่อพบต้นที่ออกผลสุก ทำการเก็บตัวอย่างผล ไม่น้อยกว่า 20 ผล/ชนิด เพื่อวัดขนาดผลสุก โดยใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ และบันทึกสีผล ตามวิธีของ Wheelwhight (1985); Kitamura *et al.* (2002); Kominami *et al.* (2003)

ชนิดสัตว์ป่าที่เข้ามาใช้ประโยชน์ผลไม้

ทำการคัดเลือกพรรณไม้ที่มีการออกผล โดยการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่า (camera traps) บริเวณกิ่งที่ออกผลหากสามารถติดได้ หรือบริเวณใต้ต้นไม้ที่มีผลสุก (Figure 1A) โดยเลือกตำแหน่งที่คาดว่าผลไม้สุกจะร่วงลงมาบนพื้น ติดตั้งกล้องสูงจากพื้นดินประมาณ 30-50 เซนติเมตร (Figure 1B) เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์ของสัตว์ที่หากินตามพื้น (terrestrial animal) ตั้งค่ากล้องดักถ่ายภาพอัตโนมัติให้บันทึกภาพเคลื่อนไหว 30 วินาที/ครั้ง เว้น 10 วินาที ติดตั้งกล้องจนกว่าต้นผลไม้จะหมดต้นหรือไม่พบผลสุกบริเวณใต้ต้น (Campos *et al*., 2012) ทำการเฝ้าสังเกตต้นไม้ที่มีผลสุก 1 วัน (One day observation) (Figure 1C) โดยเฝ้าสังเกตการเข้าใช้ประโยชน์ของสัตว์กินผลไม้ที่หากินบนพื้น (terrestrial animal) และหากินบนเรือนยอด (arboreal animal) ในตอนกลางวัน บริเวณใต้ต้นไม้ที่มีผลสุกในช่วงเวลาที่เข้าไปศึกษาชีพลักษณ์ของพรรณไม้ในแต่ละเดือน และเป็นต้นเดียวกับที่ติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพสัตว์ โดยสังเกตตั้งแต่เวลา 7.00-16.00 น. เนื่องจากช่วงเวลาในตอนเช้าก่อน 7.00 น. และหลังเวลา 16.00 น. จะสังเกตเห็นตัวสัตว์ป่าในพื้นที่ได้ยาก และหากมีการสุกของผลไม้มากกว่า 1 ต้นต่อชนิด ให้เลือกสังเกตเพียงต้นเดียว (Sankamethawee *et al*., 2011) นำข้อมูลที่ได้จากการสังเกตมาแบ่งกลุ่มสัตว์ป่าออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (mammal) และกลุ่มนก (bird)

Figure 1 Ripe-fruit beneath fruiting trees (A), Camera trap (B) and Direct observation (C).

การวิเคราะห์ข้อมูล

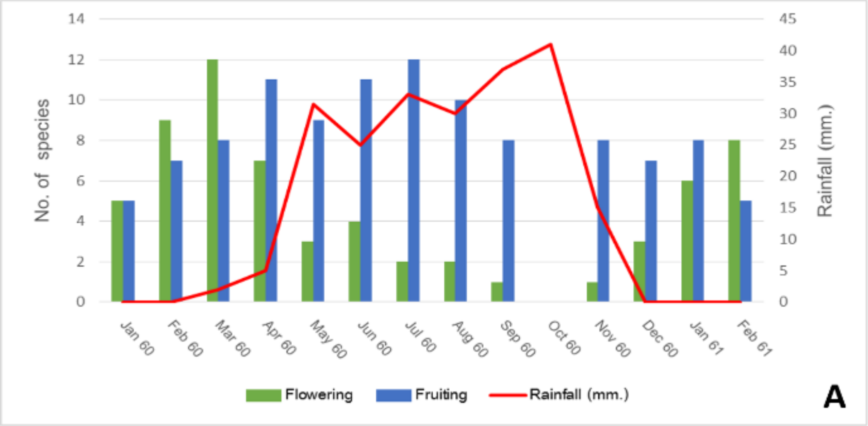
นำข้อมูลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างผลสุกและเป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้ มาแบ่งกลุ่มพรรณไม้ตามลักษณะของผล ตามวิธีของ Janson (1983) ดังนี้ ขนาดผล แบ่งกลุ่มจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลออกเป็น 3 กลุ่ม โดยการนำข้อมูลขนาดผลจากทุกชนิดที่เป็นอาหารสัตว์มาเรียงข้อมูล แล้วแบ่งกลุ่ม คือ ขนาดผลเล็ก (small fruits) ขนาดผลกลาง (medium fruits) และขนาดผลใหญ่ (large fruits) ชนิดผล แบ่งเป็น 5 กลุ่ม คือ ผลแห้งแตก (dehiscent) ผลมะเดื่อ (syconium) ผลเมล็ดเดียวแข็ง (drupe) ผลมีหลายเมล็ด (berry) และผลกลุ่ม (aggregate fruit) และสีผล แบ่งเป็น 6 กลุ่ม คือ สีแดง (red) สีส้ม-แดง (orange-red) สีเหลือง-สีเขียว (yellow-green) สีม่วง-ดำ (purple-black) สีเขียว (green) และสีเหลือง (yellow) และพิจารณาจากการเข้าใช้ประโยชน์ของสัตว์กินผลไม้กับผลสุกด้วยค่าร้อยละความถี่

ผลและวิจารณ์

ชีพลักษณ์พรรณไม้ในป่าผสมผลัดใบเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง

จากการศึกษาชีพลักษณ์ของพรรณไม้ทั้งหมด 1,927 ต้น 20 วงศ์ 29 สกุล 34 ชนิด ในช่วงเวลาที่สำรวจ (ยกเว้นเดือนตุลาคม เพราะไม่สามารถเข้าไปพื้นที่ศึกษาได้ เนื่องจากถนนขาด) พบพรรณไม้ที่ออกดอกและออกผลในช่วงเวลาที่ทำการศึกษามีจำนวน 17 ชนิด จากทั้งหมด 34 ชนิด ในเดือนที่พบพรรณไม้ออกผลมากที่สุดคือเดือนกรกฎาคม จำนวน 12 ชนิด อยู่ในช่วงฤดูฝน (เดือนมิถุนายน-ตุลาคม) เป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำฝน และ

ปริมาณน้ำในลำห้วยข้าแข้งมาก ด้วยปัจจัยทางกายภาพนี้มีส่วนทำให้พรรณไม้ออกผลและดึงดูดให้สัตว์ช่วยในการกระจายเมล็ด (seed dispersal) (Kominami *et al*., 2003) สอดคล้องกับการศึกษาของ Kitamura (2000) พบว่าการออกผลของพรรณไม้จะมากที่สุดในเดือนกรกฎาคม-กันยายนขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนในปีนั้นๆ โดยพรรณไม้จะออกผลเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มเข้าสู่ฤดูฝน (Figure 2)



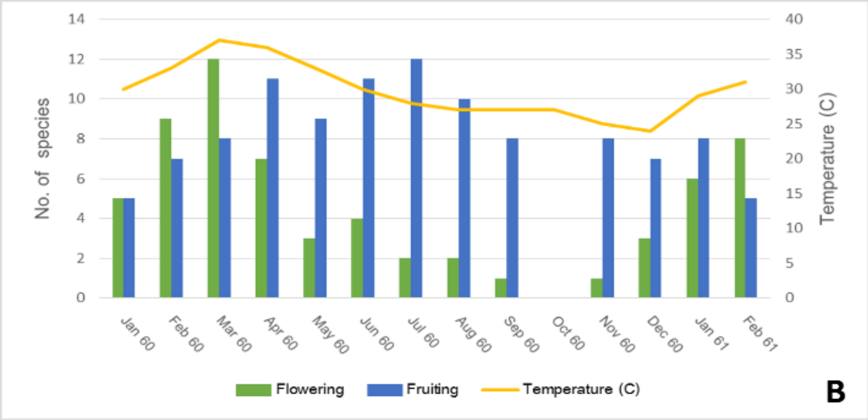


Figure 2 Phenology form average monthly rainfall (A) and average monthly Temperature (B).

พรรณไม้ที่เป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้ในแปลงป่าผสมผลัดใบ

พรรณไม้ที่เป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้ทั้งหมด 1,653 ต้น 7 วงศ์ 9 สกุล 12 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 35.30 ของชนิดพันธุ์ทั้งหมดและร้อยละ 85.78 ของจำนวนต้นไม้ทั้งหมด แบ่งตามลักษณะผล ได้แก่ ขนาดผลสามารถแบ่ง 3 กลุ่ม พบว่าผลขนาดเล็ก (ขนาดผลระหว่าง 7.44-17.54 มม.) เป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 41.67 ของจำนวนชนิด พบ 5 ชนิด รองลงมาได้แก่ ผลขนาดกลาง (ขนาดผลระหว่าง 17.55-27.65 มม.) พบ 4 ชนิด และผลขนาดใหญ่ (ขนาดผลระหว่าง 27.66-37.76 มม.) พบ 3 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 33.33 และ 25 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาขนาดผลต่อการเลือกกินของสัตว์กินผลไม้ พบว่าขนาดของผลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (chi-square=6.740, df=2, $p<0.05$) แสดงให้เห็นว่าขนาดผลมีอิทธิพลต่อการเลือกกินของสัตว์ป่า โดยผลขนาดเล็กพบสัตว์เข้าใช้ประโยชน์มากที่สุด แบ่งเป็นกลุ่มนก 20 ชนิด และกลุ่มสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 7 ชนิด (คิดเป็นร้อยละ 84.37 ของชนิดสัตว์ทั้งหมด) ยกตัวอย่างเช่น นกแก๊ก (*Anthracoceros albirostris*) ไก่ป่า (*Gallus gallus*) และกระรอกปลายหางดำ (*Callosciurus caniceps*) เป็นต้น ซึ่งผลและเมล็ดขนาดเล็กส่วนใหญ่มีจำนวนผลบนต้นมาก ทำให้สามารถดึงดูดนกเข้ามาใช้ประโยชน์เพิ่มจำนวนมากขึ้น (Wheelwright, 1985) ชนิดผลแบ่งได้ 5 กลุ่ม พบว่าชนิดผลแบบผลมะเดื่อ เป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 33.33 ของ

จำนวนชนิด พบ 4 ชนิด รองลงมา ได้แก่ ผลผนังชั้นในแข็ง พบ 3 ชนิด ผลแห้งแตก และผลกลุ่ม พบ 2 ชนิด และผลมีหลายเมล็ด พบ 1 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 25, 16.67, 16.67 และ 8.33 ตามลำดับ ชนิดผลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (chi-square = 13.3548, df = 4, $p<0.05$) ซึ่งมีผลต่อการเลือกกิน พบว่า ชนิดผลแบบผลมะเดื่อหรือผลไทร (fig) พบสัตว์เข้าใช้ประโยชน์มากที่สุด ได้แก่ มะเดื่ออุทุมพร (*Ficus racemosa* L.) เนื่องจากเป็นผลที่ฉ่ำน้ำ เปลือกไม่แข็ง มีหลายขนาด ส่วนสีผลแบ่งออกเป็น 6 กลุ่ม พบว่าพรรณไม้ที่มีสีม่วง-ดำ เป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้มากที่สุด พบ 3 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 25 ของจำนวนชนิด รองลงมาได้แก่ พบพรรณไม้ที่มีผลสีแดง ผลสีเหลือง-เขียว ผลสีเขียว ผลสีเหลือง สีละ 2 ชนิด ส่วนผลสีส้ม-แดง พบ 1 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 16.67, 16.67, 16.67, 16.67 และ 8.33 ตามลำดับ (Table 1) สีผลมีอิทธิพลต่อการเลือกกินของสัตว์ พบว่า สีผลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (chi-square=13.629, df=5, p -value<0.05) โดยสัตว์กลุ่มนกเลือกกินสีม่วง-ดำ เนื่องจากการมองเห็นผลที่สีความยาวคลื่นสีแดงได้ดี (Wilson and Melampy, 1983) ส่วนสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะเลือกกินผลไม้ที่มีสีเขียว เนื่องจากมองเห็นของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะมีเซลล์รูปกรวยที่มีความไวสเปกตรัม 2 ระดับ (dichromatic vision) ทำให้การมองเห็นสีที่มีคลื่นยาว (สีแดง สีส้ม) ได้ไม่ดี (Lewis *et al.*, 2013) ยกตัวอย่างเช่น ผลของ มะป่วน *(Mitrephora vandaeflora* Kurz) ดีหมี (*Cleidion javanicum* Blume.) และมะเดื่อกวาง (*F. callosa* Willd.) เป็นต้น

Table 1 Fruit species used in the study site and fruit characteristics.

Family	Species	Code	N	Means±SE (mm.)	Fruit size	Fruit type	Fruit color
Annonaceae	*Mitrephora vandaeflora* Kurz	MITVA	30	25.26 ± 0.14	medium	aggregate	yellow
	Polyalthia suberosa (Roxb.) Thwaites.	POLSU	30	7.44 ± 0.28	small	aggregate	purple - black
Celastraceae	*Siphonodon celastrineus* Griff.	SIPCE	33	29.39 ± 0.76	large	berry	yellow
Euphorbiaceae	*Cleidion javanicum* Blume.	CLEJA	34	19.20 ± 0.43	medium	dehiscent	green
	Mallotus nudiflorus (L.) Kulju & Walz.	MALNU	31	37.73 ± 0.51	large	drupe	green
Lauraceae	*Litsea grandis* (Nees) Hook.f.	LITGR	31	8.48 ± 0.92	small	drupe	purple - black
Meliaceae	*Aphanamixis polystachya* (Wall.) R. Parker.	APHPO	32	13.51 ± 0.27	small	dehiscent	red
Moraceae	*Ficus albipila* (Miq.) King.	FICAL	54	15.05 ± 0.44	small	syconium	orange -red
	Ficus callosa Willd.	FICCA	33	21.87 ± 0.29	medium	syconium	yellow - green
	Ficus Kurzii King.	FICKU	36	19.00 ± 0.37	medium	syconium	purple - black
	Ficus racemosa L.	FICRA	32	32.07 ± 0.73	large	syconium	red
Putranjivaceae	*Drypetes roxburghii* (Wall.) Hurusawa.	DRYRO	31	14.22 ± 0.40	small	drupe	yellow - green

การใช้ประโยชน์ผลของสัตว์กินผลไม้ในแปลงป่าผสมผลัดใบ

พบว่ามีสัตว์กินผลไม้เข้ามาใช้ประโยชน์กับพรรณไม้ที่เป็นอาหารทั้ง 12 ชนิด จำแนกเป็นสัตว์ป่า 32 ชนิด แบ่งเป็นสัตว์กลุ่มนก 22 ชนิด และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 10 ชนิด พบสัตว์เข้าใช้ประโยชน์ทั้งกลางวันและกลางคืน 779 ครั้ง แบ่งเป็นสัตว์กลุ่มนกพบมากที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ ไก่ป่า (*G. gallus*) จำนวน 135 ครั้ง รองลงมาได้แก่ นกแก๊ก (*A. albirostris*) จำนวน 57 ครั้ง และไก่ฟ้าหลังเทา (*Lophura leucomelanos*) จำนวน 22 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 17.33, 7.31 และ 2.28 ของจำนวนครั้งที่พบเห็น ตามลำดับ (Table 2) และในกลุ่มสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่พบได้มากที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ กวางป่า (*Rusa unicolor*) จำนวน 109 ครั้ง รองลงมาได้แก่ เก้ง (*Muntiacus muntjak*) จำนวน 85 ครั้ง และหมูป่า (*Sus scrofa*) จำนวน 74 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 14, 10.91 และ 9.5 ของจำนวนครั้งที่พบเห็น ตามลำดับ (Table 3)

Table 2 Frequency of fruit consumption by birds.

Species	MIT VA	POL SU	SIP CE	CLE JA	MAL NU	LIT GR	APH PO	FIC AL	FIC CA	FIC KU	FIC RA	DRY RO	Total
Gallus gallus	11	-	35	20	-	5	-	53	-	11	-	-	135
Anthracoceros albirostris	-	-	-	-	-	12	11	8	-	8	13	5	57
Lophura leucomelanos	-	-	-	-	-	18	-	-	-	4	-	-	22
Nyctyornis athertoni	-	-	-	-	-	-	-	1	-	12	6	-	19
Megalaima lineata	-	-	-	-	-	4	-	3	-	4	6	1	18
Pavo muticus	-	-	-	-	-	-	9	4	-	2	-	-	15
Chalcophaps indica	-	-	-	3	-	1	-	-	9	-	-	-	13
Psittacula alexandri	-	-	-	-	-	-	8	3	-	-	-	-	11
Pycnonotus melanicterus	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	10
Ducula aenea	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	9	10
Eudynamys scolopacea	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	5	7
Urocissa erythroryncha	-	3	-	-	-	-	-	-	2	-	-	1	6
Gracula religiosa	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	1	5
Rhyticeros subruficollis	-	-	-	-	-	-	-	2	-	2	-	-	4
Pycnonotus finlaysoni	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	4
Megalaima faiostricta	-	-	-	-	-	1	-	-	-	3	-	-	4
Dicrurus paradiseus	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	3
Arborophila chloropus	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Picus flavinucha	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	2
Xantholaema haemacephala	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
Phaenicophaeus fristis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Megalaima asiatica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Total	11	3	38	23	0	57	28	83	11	48	26	23	351

1/ MITVA = *Mitrephora vandaeflora* Kurz 2/ POLSU = *Polyalthia suberosa* (Roxb.) Thwaites. 3/ SIPCE = *Siphonodon celastrineus* Griff.
4/ CLEJA = *Cleidion javanicum* Blume. 5/ MALNU = *Mallotus nudiflorus* (L.) Kulju & Walz. 6/ LITGR = *Litsea grandis* (Nees) Hook.f.
7/ APHPO = *Aphanamixis polystachya* (Wall.) R. Parker. 8/ FICAL = *Ficus albipila* (Miq.) King. 9/ FICCA = *Ficus callosa* Willd.
10/ FICKU = Ficus Kurzii King. 11/ FICRA = Ficus racemosa L. 12/ DRYRO = Drypetes roxburghii (Wall.) Hurusawa.

Table 3 Frequency of fruit consumption by mammals.

Species	MIT VA	POL SU	SIP CE	CLE JA	MAL NU	LIT GR	APH PO	FIC AL	FIC CA	FIC KU	FIC RA	DRY RO	Total
Rusa unicolor	-	-	20	3	7	-	-	8	18	-	53	-	109
Muntiacus muntjak	4	-	2	9	4	18	11	22	5	6	4	-	85
Sus scrofa	5	-	-	-	-	-	-	9	-	5	55	-	74
Callosciurus caniceps	-	4	8	3	-	1	1	7	-	9	11	-	44
Rattus spp.	-	-	19	-	-	-	-	-	24	-	-	-	43
Paradoxurus hermaphroditus	1	-	14	10	-	-	-	-	-	-	12	-	37
Macaca fascicularis	3	5	5	-	-	-	2	-	-	-	-	-	15
Ratufa bicolor	-	-	-	-	-	1	1	4	-	2	4	-	12
Hystrix brachyura	-	-	3	-	-	-	5	-	-	-	-	-	8
Tamiops mcclellandii	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Total	13	9	71	26	11	20	20	50	47	22	139	0	428

1/ MITVA = *Mitrephora vandaeflora* Kurz
2/ POLSU = *Polyalthia suberosa* (Roxb.) Thwaites.
3/ SIPCE = *Siphonodon celastrineus* Griff.
4/ CLEJA = *Cleidion javanicum* Blume.
5/ MALNU = *Mallotus nudiflorus* (L.) Kulju & Walz.
6/ LITGR = *Litsea grandis* (Nees) Hook.f.
7/ APHPO = *Aphanamixis polystachya* (Wall.) R. Parker.
8/ FICAL = *Ficus albipila* (Miq.) King.
9/ FICCA = *Ficus callosa* Willd.
10/ FICKU = *Ficus Kurzii* King.
11/ FICRA = *Ficus racemosa* L.
12/ DRYRO = *Drypetes roxburghii* (Wall.) Hurusawa.

สรุป

พื้นที่แปลงถาวรขนาด 1 เฮกตาร์ จำนวน 3 แปลง ในป่าผสมผลัดใบ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง พบพรรณไม้ทั้งหมด 1,927 ต้น 20 วงศ์ 29 สกุล และ 34 ชนิด พรรณไม้ที่ออกดอกและออกผลในช่วงเวลาที่ทำการศึกษามีจำนวน 17 ชนิดและ 12 ชนิด เป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้ ลักษณะผลที่เป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้มากที่สุดคือ ผลขนาดเล็ก ชนิดผลมะเดื่อและผลสีม่วง-ดำ ซึ่งลักษณะผลนี้พบว่าเป็นผลของต้นไม้กลุ่มไทร (fig trees) ซึ่งอยู่ในวงศ์ Moraceae ทั้งหมด สัตว์กินผลไม้ที่พบในพื้นที่ศึกษาเข้าใช้ประโยชน์ต้นผลไม้สุกทั้งหมด 32 ชนิด แบ่งเป็นสองกลุ่ม คือกลุ่มนก 22 ชนิด พบว่า ไก่ป่า (*G. gallus*) เข้าใช้ประโยชน์มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 17.33, ของจำนวนครั้งที่พบเห็น ส่วนสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมพบ 10 ชนิด พบว่า กวางป่า (*R. unicolor*) ใช้ประโยชน์มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 14 ของจำนวนครั้งที่พบเห็น ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดการพรรณไม้ที่เป็นอาหารของสัตว์กินผลไม้เพื่อการจัดการสัตว์ป่าในพื้นที่ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมูลนิธิศึกษาและวิจัยนกเงือก บริษัท เฌอรา จำกัด (มหาชน) ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง และเจ้าหน้าที่

เอกสารอ้างอิง

ดวงใจ สุขเฉลิม, สันติ สุขสะอาด และ ยงยุทธ์ ไตรสุรัตน์. 2558. **คู่มือการศึกษาป่าไม้ไทย.** กองทุนจัดพิมพ์ตำราป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ดอกรัก มารอด และอุทิศ กุฏอินทร์. 2552. **นิเวศวิทยาป่าไม้.** โรงพิมพ์อักษรสยามการพิมพ์. กรุงเทพฯ

Campos, R.C., J. Steiner and A. Zillikens. 2012. Bird and mammal frugivores of *Euterpe edulis* at Santa Catarina island monitored by camera traps. **Studies on Neotropical Fauna and Environment** 47(2): 105-110.

Janson, C.H. 1983. Adaptation of fruit morphology to dispersal agents in a Neotropical forest. **Science** 215: 19-27.

Kitamura, S. 2000. **Seed dispersal by Hornbills in a Tropical Forest in Khao Yai National Park, Thailand.** M.S. Thesis, Kyoto University

________, S., T. Yumoto, P. Poonswad, P. Chuailua, K. Plongmai, T. Maruhashi and N. Noma. 2002. Interactions between fleshy fruits and frugivores in a tropical seasonal forest in Thailand. **Oecologia** 133: 559-572.

Kominami, Y., T. Sato, K. Takeshita, T. Manabe, A. Endo and N. Noma. 2003. Classification of bird-dispersed plants by fruiting phenology, fruit size, and growth form in a primary lucidophyllous forest: an analysis, with implications for the conservation of fruit-bird interactions. **Ornithological Science** 2(1): 3-23.

Lewis, D.E., J. Pearson and S.K. Khuu. 2013. The color “Fruit”: Object Memories Defined by Color. **PloS ONE** 8(5): e64960.

Sankamethawee, W., A.J. Pierce, G.A. Gale and B.D. Hardesty. 2011. Plant-frugivore interactions in an intact tropical forest in north-east Thailand. **Integrative Zoology** 6: 195-212.

Wheelwhight, N.T. 1985. Fruit-Size, Gape Width, and the Diets of Fruit-Eating Bird. **Ecology** 66: 808-818.

Wilson, M.F. and M.N. Melampy. 1983. The effect of bicolored fruit displays on fruit removal by avian frugivores. **Oikos** 41: 27-31.

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

1.	รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิจัย (รองศาสตราจารย์ ดร.ศรปราชญ์ ธไนศวรรยางกูร)	ที่ปรึกษา
2.	รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ลดาวัลย์ พวงจิตร)	ที่ปรึกษา
3.	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภา มหากาญจนกุล)	ที่ปรึกษา
4.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิพันธ์ แก้วสมพงษ์	ประธานกรรมการ
5.	รองผู้อำนวยการฝ่ายประสานงานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพล ไชยแสน)	รองประธานกรรมการ
6.	ประธานฝ่ายสารสนเทศ (รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย นำประเสริฐชัย)	กรรมการ
7.	ประธานฝ่ายจัดทำเอกสารทางวิชาการ รองผู้อำนวยการฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ดร.วราพรรณ อภิศุภะโชค)	กรรมการ
8.	ประธานสาขาพืช (รองศาสตราจารย์ ดร.อลิศรา มีนะกนิษฐ)	กรรมการ
9.	ประธานสาขาสัตว์ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี โสพรรณรัตน์)	กรรมการ
10.	ประธานสาขาประมง (รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย วรวัฒนเมธีกุล)	กรรมการ
11.	ประธานสาขาสัตวแพทยศาสตร์ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นสพ. เมธา จันดา)	กรรมการ
12.	ประธานสาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชราวดี ศรีบุญเรือง)	กรรมการ
13.	ประธานสาขาวิทยาศาสตร์ (รองศาสตราจารย์ ดร.อรินทิพย์ ธรรมชัยพิเนต)	กรรมการ
14.	ประธานสาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ)	กรรมการ

15. ประธานสาขาอุตสาหกรรมเกษตร กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขนิษฐา วัชราภรณ์)
16. ประธานสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แก้วจำปา)
17. ประธานสาขาศึกษาศาสตร์ กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิกุล เอกวรางกูร)
18. ประธานสาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เรวัตร ธรรมาอภิรมย์)
19. ประธานสาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ กรรมการ
(ดร.วัณณนา สุนทรนฤรังษี)
20. รองผู้อำนวยการฝ่ายมาตรฐานการวิจัย กรรมการและเลขานุการ
สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ปลื้มภาณุภัทร)
21. นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
22. นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป ผู้ช่วยเลขานุการ
23. นางสาวรัตนาภรณ์ ไชยแสน ผู้ช่วยเลขานุการ
24. นางสาวอรญา ศรีอนันต์ ผู้ช่วยเลขานุการ
25. นางนวรัตน์ สุวรรณเลิศ ผู้ช่วยเลขานุการ

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิทยาศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ดร.ครศร ศรีกุลนาถ	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
2. รศ.ดร.ชัชวาล จันทราสุริยารัตน์	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
3. รศ.ดร.พิทักษ์ เชื้อวงศ์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
4. รศ.ดร.วิเชียร กิจปรีชาวนิช	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
5. รศ.ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
6. ผศ.ดร.กันย์ สุ่นยี่ขัน	ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
7. ผศ.ดร.ชัชวาล วงศ์ชูสุข	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
8. ผศ.ดร.ณัฐนันท์ ต.เทียนประเสริฐ	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
9. ผศ.ดร.เดือนรัตน์ ชลอุดมกุล	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
10. ผศ.ดร.ธีรศักดิ์ เอโกบล	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
11. ผศ.ดร.นันทนา สีสุข	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
12. ผศ.ดร.ปกรณ์ วรรธณอมร	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
13. ผศ.ดร.ประดิษฐ์ แสงทอง	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
14. ผศ.ดร.ปราโมทย์ ชำนาญปืน	ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
15. ผศ.ดร.พงศกร จันทรัตน์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
16. ผศ.ดร.พงศ์เทพ ประจงทัศน์	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
17. ผศ.ดร.วันชัย ปลื้มภาณุภัทร	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
18. ผศ.ดร.วีรพัฒน์ พลอัน	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
19. ผศ.ดร.ศศิมนัส อุณจักร์	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
20. ผศ.ดร.สมพิศ สามิภักดิ์	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
21. ผศ.ดร.สายใจ ชาญเศรษฐิกุล	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
22. ผศ.ดร.อภิชาติ พัฒนโภครัตนา	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
23. ผศ.ดร.อรรณพ หอมจันทร์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
24. ผศ.ดร.อัญชณี คูเบอร่า	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
25. ผศ.ดร.อุไรวรรณ อรัญวาสน์	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
26. ผศ.ดร.เอกพันธ์ ไกรจักร์	ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
27. ผศ.ดร.ธรณินทร์ ทันศรี	ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
28. ผศ.ดร.ปพิชญา ชัยสกุล	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
29. ผศ.ดร.ฤทธี มีสัตย์	ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์
30. ดร.กัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ	ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
31. ดร.คทารัตน์ ชูศรีเอี่ยม	ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์
32. ดร.ครองขวัญ อัครชนียากร	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
33. ดร.จตุพร กุลอึ้ง	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

34. ดร.ชนิตา บุญมาก ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
35. ดร.ชมดาว สินธุวณิชย์ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
36. ดร.พิชามญชุ์ เกียรติวุฒินนท์ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
37. ดร.ภวิกา ลิ้มอุดมพร ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
38. ดร.มิ่งขวัญ นิพิฐวัธนะผล ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
39. ดร.มินตา ชัยประสงค์สุข ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
40. ดร.เมษยะมาศ คงเสมา ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
41. ดร.ธารินี สาลีโภชน์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

Editorial Board

Subject: Science (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Kornsorn Srikulnath
2. Assoc.Prof.Dr.Chatchawan Jantrasuriyarat
3. Assoc.Prof.Dr.Pitak Chuawong
4. Assoc.Prof.Dr.Vichien Kitpreechavanich
5. Assoc.Prof.Dr.Surasak Chiangga
6. Asst.Prof.Dr.Gun Sunyeekhan
7. Asst.Prof.Dr.Chatchawal Wongchoosuk
8. Asst.Prof.Dr.Nattanan T.Thienprasert
9. Asst.Prof.Dr.Duenrut Chonudomkul
10. Asst.Prof.Dr.Teerasak E-kobon
11. Asst.Prof.Dr.Nantana Srisuk
12. Asst.Prof.Dr.Pakorn Wattana-Amorn
13. Asst.Prof.Dr.Pradit Sangthong
14. Asst.Prof.Dr.Pramote Chumnanpuen
15. Asst.Prof.Dr.Pongsakorn Jantaratana
16. Asst.Prof.Dr.Pongthep Prajongtat
17. Asst.Prof.Dr.Wanchai Pluempanupat
18. Asst.Prof.Dr.Weeraphat Pon-on
19. Asst.Prof.Dr.Sasimanas Unajak
20. Asst.Prof.Dr.Sompid Samipak
21. Asst.Prof.Dr.Saijai Charnsethikul
22. Asst.Prof.Dr.Apichart Pattanaporkratana
23. Asst.Prof.Dr.Unnop Homchan
24. Asst.Prof.Dr.Anchanee Kubera
25. Asst.Prof.Dr.Uraiwan Arunyawat
26. Asst.Prof.Dr.Ekaphan Kraichak
27. Dr.Thorranin Thansri
28. Dr.Papichaya Chaisakul
29. Dr.Ridthee Meesat
30. Dr.Kannaree Chuangcham
31. Dr.Katarut Chusreeaeom
33. Dr.Khrongkhwan Akkarachaneeyakorn
34. Dr.Chatuporn Kuleung
35. Dr.Chanita Boonmak
36. Dr.Chomdao Sinthuvanich
37. Dr.Pichamon Kiatwuthinon
38. Dr. Paviga Limudomporn
39. Dr.Mingkwan Nipitwattanaphon
40. Dr. Minta Chaiprasongsuk
41. Dr. Mesayamas Kongsema
42. Dr. Tharinee Sareepoch

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ชนิกานต์ ยิ้มประยูร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
2. ผศ.สุภาพร แก้วกอ เลี่ยวไพโรจน์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

3. ผศ.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
4. รศ.คณิตา ตังคณานุรักษ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
5. รศ. ปองวิทย์ ศิริโพธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
6. รศ.เวชพงศ์ ชุติชูเดช	ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
7. ผศ.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์
8. นายศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล	ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์
9. รศ.มานพ เจริญไชยตระกูล	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
10. น.ส.วลีพร ดอนไพร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
11. น.ส.ศุภพัชรี รอดเดชา	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
12. ผศ.อนุสรณ์ สืบสาย	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
13. ผศ.กรรมมันต์ ชูประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
14. ผศ.เฉลิมพล เปล่งสะอาด	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
15. รศ.ชวลิต กิตติชัยการ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
16. รศ.ชัยยากร จันทร์สุวรรณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
17. รศ.ณัฐศักดิ์ บุญมี	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
18. ผศ.ธเนศ อรุณศรีโสภณ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
19. รศ.ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
20. ผศ.ประพจน์ ขุนทอง	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
21. ผศ.วีรชัย ชัยวรพฤกษ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
22. ผศ.อรรถพร วิเศษสินธุ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
23. รศ.เอกไท วิโรจน์สกุลชัย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
24. รศ.เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย	ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์
25. ศ.นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
26. ผศ. พรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
27. ผศ.สมฤทัย ทะสดวก	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
28. ศ.สุวัฒนา จิตตลดากร	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
29. ผศ.ดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
30. รศ.มงคล รักษาพัชรวงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
31. ผศ.วีรวุฒิ กนกบรรณกร	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
32. รศ.สมหญิง ไทยนิมิต	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
33. ผศ.สัญชัย เดชานุภาพฤทธา	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
34. ผศ.กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
35. รศ.ชวเลข วณิชเวทิน	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
36. นายธนพันธ์ คงทอง	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

37. ผศ.ธนัช สุขวิมลเสรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
38. ผศ.ธิดารัตน์ จิระวัฒนาสมกุล ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
39. ผศ.บารเมศ วรรธนะภูติ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
40. รศ.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
41. ผศ.ปิยนุช เวทย์วิวรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
42. รศ.ร.อ.พิพัฒน์ สอนวงษ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
43. ผศ.วราเมศวร์ วิเชียรแสน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
44. รศ.วีระเกษตร สวนผกา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
45. ผศ.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
46. รศ.สันติ ชินานุวัติวงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
47. รศ.สุวิมล สัจจวาณิชย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
48. นายสุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
49. นายอนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
50. รศ.อภินิติ โชติสังกาศ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
51. ศ.อมร พิมานมาศ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
52. รศ.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
53. ผศ.นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
54. น.ส.ศศิวิมล พุทธิรานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
55. รศ.สมเจตน์ พัชรพันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
56. รศ.อภิรัตน์ เลาห์บุตรี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
57. ผศ.อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
58. ผศ.จีมา ศรลัมพ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
59. รศ.พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
60. รศ.ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
61. ผศ.มณฑล ฐานุตตมวงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
62. ผศ.วิลาสินี อยู่ชัชวาล ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
63. รศ. วิไล เจียมไชยศรี ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
64. รศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
65. ผศ.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
66. ผศ.ชนะ รักษ์ศิริ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
67. ผศ.นราภรณ์ เภาประเสริฐ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
68. นายรมิดายุ อยู่สุข ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
69. ผศ.สุวิชภรณ์ วิชกูล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
70. น.ส.นุษรา สินบัวทอง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. นายธยานันท์ บุณยรักษ์	ผู้อำนวยการฝ่ายวิศวกรรม บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)
2. น.ส.จุฬารัตน์ วัฒนกิจ	School of Energy Science & Engineering (ESE) สถาบันวิทยสิริเมธี
3. รศ.ภารดี ช่วยบำรุง	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
4. ผศ.สิรินทรา วัณโณ	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. รศ.ยิ่งสวัสดิ์ ไชยะกุล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
6. ผศ.ศศิมา เจริญกิจ	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
7. ผศ.สุวรรณา รองวิริยะพานิช	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
8. นาย ดารณี จารีมิตร	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
9. ผศ.โกวิท สุวรรณหงส์	คณะสาธารณสุข สาขาอนามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยบูรพา
10. นายอภิวรรธน์ โชติสังกาศ	ผู้อำนวยการกลุ่มสำรวจข้อมูลการจราจรศูนย์ข้อมูลข่าวสาร อิเล็กทรอนิกส์ของราชการ สำนักการจราจรและขนส่ง
11.ผศ.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
12. ผศ.ปริญญา คงพรม	ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
13. ผศ.ทรรศนีย์ พฤกษาสิทธิ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
14. รศ.พัชรินทร์ วรรธนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
15. รศ.ชาคริต สุวรรณจำรัส	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
16. ผศ.รุ่ง กิตติพิชัย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่อกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
17. นายเจษฎาภรณ์ ปริยดำกล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
18. รศ.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
20. ผศ.วรวรรธน์ นาคะวิโร	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

21. รศ.ทรงยศ นาคอริยกุล ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

22. ผศ.สำเริง ฮินท่าไม้ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

23. ผศ.ธีวรา สุวรรณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

24. ผศ.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

25. น.ส.เพชร์รัตน์ ลิ้มสุปรียารัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

26. ผศ.ฐิรวัตร บุญญะฐี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

27. รศ.พิชชา จองวิวัฒสกุล ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

28. นายพุทธิพล ดำรงชัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

29. ผศ.วัชระ เพียรสุภาพ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

30. นายวีรยุทธ โกมลวิลาศ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

31. ผศ. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

32. ผศ.อัครวัชร เล่นวารี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

33. รศ.อัครวัชร เล่นวารี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

34. ผศ.ทรงยศ กิจธรรมเกษร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

35. ผศ.ปิติวัฒน์ วัฒนชัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

36. ผศ.มานพ แก้วโมราเจริญ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

37. ศ.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

38. รศ.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
39. ผศ.วิรุฬห์ คำชุม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
40. ผศ.อารียา ฤทธิมา	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
41. ผศ.ฉัตรชัย วีระนิติสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
42. ผศ.ณัฐพงศ์ รัตนเดช	ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร
43. รศ.ชวลิต รัตนธรรมสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย
44. รศ.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย
45. รศ.สุธา ขาวเธียร	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย
46. รศ.เฉลิมราช วันทวิน	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
47. ผศ.เอราวิล ถาวร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
48. ผศ.ฤกษ์ชัย ศรีวรมาศ	ภาควิศวโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
49. ผศ.อรพดี จูฉิม	รองประธานหลักสูตรวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
50. ผศ.คณิน เนื่องโนราช	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
51. รศ.ต่อพงศ์ กรีธาชาติ	สาขาวิชาวิศกรรมสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยพลังงาน และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา
52. รศ.มณีรัตน์ องค์วรรณดี	สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
53. รศ.สร้อยดาว วินิจนันทรัตน์	สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
54. นายสรวิศ เผ่าทองสุข	ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

Editorial Board

Subject: Engineering and Architecture (Internal)

1. Assoc.Prof.Chanikarn Yimprayoon
2. Asst.Prof.Supaporn Leopairojna Kaewko
3. Asst.Prof.Chalor Jarusutthirak
4. Asst.Prof.Kanita Tungkananuruk
5. Assoc.Prof.Pongwit Siribodhi
6. Assoc.Prof.Vejapong Juttijudata
7. Asst.Prof.Siwalak Pathaveerat
8. Mr.Silisak Chertkiattipol
9. Assoc.Prof.Manop Charoenchaitrakool
10. Miss Waleeporn Donphai
11. Miss Supacharee Roddecha
12. Asst.Prof.Anusorn Seubsai
13. Asst.Prof.Kummun Chooprasird
14. Asst.Prof.Chalermpon Plengsa-Ard
15. Assoc.Prof. Chawalit Kittichaikarn
16. Assoc.Prof. Chaiyakorn Jansuwan
17. Assoc.Prof. Nathasak Boonmee
18. Asst.Prof.Tanet Aroonsrisopon
19. Assoc.Prof. Tumrong Puttapitukporn
20. Asst.Prof.Prapot Kunthong
21. Asst.Prof.Weerachai Chaiworapuek
22. Asst.Prof.Attaporn Wisessint
23. Assoc.Prof. Ekathai Wirojsakunchai
24. Assoc.Prof.Ekasit kositsakulchai
25. Prof.Nutchanart Sriwongsitanon
26. Asst.Prof.Punpim Puttaraksa Mapiam
27. Asst.Prof.Somruthai Tasaduak
28. Prof.Suwatana Chittaladakorn
29. Asst.Prof.Dulpichet Rerkpreedapong
30. Assoc.Prof.Mongkol Raksapatcharawong
31. Asst.Prof.Weerawoot Kanokbannakorn
32. Assoc.Prof.Somying Thainimit
33. Asst.Prof.Sanchai Dechanupaprittha
34. Asst.Prof.Kitjapat Phuvoravan
35. Assoc.Prof. Chavalek Vanichvetin
36. Mr.Thanapan Kongtong
37. Asst.Prof.Thanat Sukwimonseri
38. Asst.Prof.Tidarut Jirawattanasomkul
39. Asst.Prof.Barames Vardhanabhuti
40. Assoc.Prof. Prasert Suwanvitaya
41. Asst.Prof.Piyanut Wethavivorn
42. Assoc.Prof. Lt.Pipat Sornwong
43. Asst.Prof.Varameth Vichiensan
44. Assoc.Prof. Weerakaset Suanpaga
45. Asst.Prof.Suphawut Malaikrisanachalee
46. Assoc.Prof. Santi Chinanuwatwong
47. Assoc.Prof. Suwimon Satchawanit
48. Mr.Susit Chaiprakaikeow
49. Mr.Anuwat Attachaiyawuth
50. Assoc.Prof. Apiniti Jotisankasa
51. Prof.Amorn Pimanmas
52. Assoc.Prof. Duangrudee Chaysuwan
53. Asst. Prof.Nuchnapa Tangboriboon
54. Miss Sasiwimon Buddhiranon
55. Assoc.Prof. Somjate Patcharaphun
56. Assoc.Prof. Apirat Laobuthee
57. Asst.Prof.Amonrat Lertworasirakun
58. Asst.Prof.Cheema Soralump
59. Assoc.Prof. Pongsak Noophan
60. Assoc.Prof. Patcharaporn Suwanvitaya
61. Asst.Prof.Monthon Thanuttamavong
62. Asst.Prof.Wilasinee Yoochatchaval
63. Assoc.Prof. Wilai Chiemchaisri
64. Assoc.Prof. Suchat Leungprasert
65. Asst.Prof.Chuckaphum Aramphongphun
66. Asst. Prof.Chana Raksiri

67. Asst.Prof.Naraporn Phaoprasert
68. Mr.Ramidayu Yousuk
69. Asst. Prof.Suwitchaporn Witchakul
70. Miss Nusara Sinbuathong

Subject: Engineering and Architecture (External)

1. Mr.Thayanan Boonyarak
2. MissChularat Wattanakit
3. Assoc.Prof.Paradee Chuaybamroong
4. Asst.Prof.Sirintra Vanno
5. Assoc.Prof.Yingsawad Chaiyakul
6. Asst.Prof.Sasima Charoenkit
7. Asst.Prof.Suwanna Rongwiriyaphanich
8. Mr.Daranee Jareemit
9. Asst.Prof.Kowit Suwannahong
10. Mr.Apivat Jotisankasa
11. Asst.Prof.Sanit Wongsa
12. Asst.Prof.Parinya Khongprom
13. Asst.Prof.Tassanee Prueksasit
14. Assoc.Prof. Patcharin Worathanakul
15. Asst.Prof.Chakrit Suvanjumrat
16. Asst.Prof.Rung Kittipichai
17. Mr.Jetsadaporn Priyadumkol
18. Assoc.Prof.Suttichai Premrudeepreechacharn
19. Asst.Prof.Worawat Nakhaviro
20. Assoc.Prof.Songyot Nakariyakul
21. Asst.Prof.Samroeng Hontamai
22. Asst.Prof.Teewara Suwan
23. Asst.Prof.Peerapong Jitsangiam
24. Miss Petcharat Limsupreeyarat
25. Assoc.Prof. Tirawat Boonyatee
26. Asst.Prof.Pitcha Jongvivatsakul
27. Asst.Prof.Puttipol Dumrongchai
28. Asst.Prof.Vachara Peansupap
29. Mr.Veerayut Komolvilas
30. Asst.Prof.Sawekchai Tangaramvong
31. Assoc.Prof. Akhrawat Lenwari
32. Assoc.Prof. Akhrawat Lenwari
33. Assoc.Prof. Songyot Kitthamkesorn
34. Asst.Prof.Pitiwat Wattanachai
35. Asst.Prof.Manop Kaewmoracharoen
36. Prof.Charowarit Chareeraktakoon.
37. Assoc.Prof. Suniti Suparp
38. Asst.Prof.Viroon Kamchoom
39. Asst.Prof.Areeya Rittima
40. Asst.Prof.Chatchai Veranitisagul
41. Asst.Prof.Nuttapong Ruttanadech
42. Assoc.Prof. Chavalit Ratanatamskul
43. Assoc.Prof. Wiboonluk Pungrasmi
44. Assoc.Prof. Sutha Khaodhiar
45. Assoc.Prof. Chalermraj Wantawin
46. Asst.Prof.Erawin Thavorn
47. Asst.Prof.Rerkchai Srivoramas
48. Asst.Prof.Orapadee Joochim
49. Asst.Prof.Khanin Nueangnoraj
50. Assoc.Prof. Torpong Kreetachat
51. Assoc.Prof. Maneerat Aongwandee
52. Assoc.Prof. Soydoa Vinitnantharat
53. Mr.Sorawit Powtongsook

สาขาอุตสาหกรรมการเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ดร.กมลวรรณ แจ้งชัด	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
2. ผศ.ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

3. น.ส.กรุณา วงษ์กระจ่าง	ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
4. ผศ.ดร.กฤษกมล ณ จอม	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
5. น.ส.กัษมาพร ปัญต๊ะบุตร	ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
6. ผศ.ดร.กุลนาถ ทองขาว	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
7. รศ.ดร.ฆรณี ตุ้ยเต็มวงศ์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
8. นางจันทร์เพ็ญ แสงประกาย	ฝ่ายโภชนาการและสุขภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
9. ผศ.ดร.จันทร์ทิพย์ เศรษฐยานนท์	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
10. ผศ.ดร.จุมพล วรสายัณห์	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
11. น.ส.ช่อลัดดา เที่ยงพุก	ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
12. น.ส.ชุษณา เมฆโหรา	ฝ่ายโภชนาการและสุขภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
13. ผศ.ดร.ทานตะวัน พิรักษ์	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
14. ผศ.ดร.เทพกัญญา หาญศีลวัต	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
15. รศ.ดร.นันทวัน เทอดไทย	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
16. รศ.ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
17. ดร. บัณฑิตา วานิกร	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
18. ดร. บุญทิวา นิลจันทร์	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
19. ดร.ปฐมา จาตกานนท์	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
20. นายประมวล ทรายทอง	ฝ่ายจุลชีววิทยาประยุกต์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
21. รศ.ดร.ปรารถนา ปรารถนาดี	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
22. ดร.ปัทธิมา อุดมไพจิตรกุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
23. รศ.ดร.พรธิภา องค์คุณารักษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

24. ดร. พิศมัย ศรีชาเยช	ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
25. นายพิสุทธิ์ บุตรสุวรรณ	ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
26. ผศ.ดร.เยาวภา หล่อเจริญผล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
27. ผศ.ดร.รณฤทธิ์ ฤทธิรณ	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
28. ผศ.ดร.วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
29. รศ.ดร.วรรณี จิรภาคย์กุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
30. ผศ.ดร.วลัยรัตน์ จันทรปานนท์	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
31. นายวัชรพงศ์ เลิศสุรวัฒน์	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
32. ดร.วิภา สุโรจนะเมธากุล	ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
33. ผศ.ดร.วิษฐิดา จันทราพรชัย	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
34. รศ.ดร.วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
35. ดร.ศิวาพร โอเจริญ	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
36. ดร.สาวิตรี ดือราแม	ฝ่ายจุลชีววิทยาประยุกต์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
37. ดร.สิชญา สิทธิพจน์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
38. ผศ.ดร.สิริชัย ส่งเสริมพงษ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
39. รศ.ดร.สุดสาย ตรีวานิช	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
40. ดร.สุดาทิพย์ แซ่ตั้น	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
41. ผศ.ดร.สุทธิพันธุ์ แก้วสมพงษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
42. รศ.ดร.สุนทรี สุวรรณสิชณน์	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
43. น.ส.สุภัคชนม์ คล่องดี	ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

44. ดร.สุวิมล เจริญสิทธิ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

45. รศ.ดร.เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

46. ดร.หทัยชนก กันตรง ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

47. รศ.ดร.หทัยรัตน์ ริมคีรี ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

48. ดร.อุศมา สุนทรนฤรังษี ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สาขาอุตสาหกรรมการเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ผศ.ดร.กิติพงศ์ อัศตรกุล ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์ ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. ผศ.ดร.จิรวรรณ อภิรักษากร สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
4. รศ.ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. ดร.จุฑา ทาคาฮาชิ ยูปันคิ บัณฑิตวิทยาลัยสหวิทยาการผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและอาหารสุขภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
6. รศ.ดร.ชุมพล มณฑาทิพย์กุล บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
7. รศ.ดร.ธนัญญา วสุศรี บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
8. ผศ.ดร.บุศราภา ลีละวัฒน์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
9. รศ.ดร.ประเวทย์ ตุ้ยเต็มวงศ์ ศูนย์ความปลอดภัยอาหาร สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
10. รศ.ดร.ประภาศรี เทพรักษา สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
11. ผศ.ดร.ประสาร สวัสดิ์ซิตัง สาขาวิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
12. ผศ.ดร.ปริญดา เพ็ญโรจน์ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

13. ผศ.ดร.ปริตา ธนสุกาญจน์	ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
14. ผศ.ดร.ปิยาภรณ์ เชื่อมชัยตระกูล	สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
15. ผศ.ดร.พิชญอร ไหมสุทธิสกุล	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
16. ผศ.ดร.พิสิฏฐ์ ธรรมวิถี	คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
17. รศ.ดร.ยุทธนา พิมลศิริผล	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
18. ผศ.ดร.รชา เทพษร	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
19. ผศ.ดร.รมณี สงวนดีกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
20. ดร.รัทรดา เทพประดิษฐ์	คณะอุตสาหกรรมเกษตรและชีวภาพ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
21. รศ.ดร.วรัญญู ศรีเดช	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
22. รศ.ดร.วลัยลักษณ์ อัตธีรวงศ์	สาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
23. ดร. วิไลลักษณ์ ชัยสิทธิ์	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
24. ผศ.ดร.ศิรินันท์ แก่นทอง	ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
25. ผศ.ดร.สมโภช พจนพิมล	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
26. ดร.สุธีรา วัฒนกุล	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
27. รศ.ดร.อดิศร เสวตวิวัฒน์	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
28. ผศ.ดร.อรอินทุ์ ประไชโย	ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

Editorial Board

Subject: Argo-Industry (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Kamolwan Jangchud
2. Asst.Prof.Dr.Kornthip Watcharapanyawong Techametheekul
3. Miss Karuna Wongkrajang
4. Asst.Prof.Dr. Kriskamol Na Jom
5. Miss Kassamaporn Puntaburt
6. Asst.Prof.Dr. Kullanart Tongkhao
7. Assoc.Prof.Dr.Kooranee Tuitemwong
8. Mrs.Janpen Saengprakai
9. Asst.Prof.Dr. Jantip Setthayanond
10. Asst.Prof.Dr.Jumpol Vorasayan
11. Miss Chowladda Teangpook
12. Miss Chusana Mekhora
13. Asst.Prof.Dr.Tantawan Pirak
14. Asst.Prof.Dr.Thepkunya Harnsilawat
15. Assoc.Prof.Dr.Nantawan Therdthai
16. Assoc.Prof.Dr.Namfone Lumdubwong
17. Dr.Bandhita Wanikorn
18. Dr.Boontiwa NInchan
19. Dr.Pathama Chatakanonda
20. Mr.Pramuan Saithong
21. Assoc.Prof.Dr.Parthana Parthanadee
22. Dr.Pathima Udompijitkul
23. Assoc.Prof.Dr.Pornthipa Ongkunaruk
24. Dr.Phisamai Srichayet
25. Mr.Pisut Butsuwan
26. Asst.Prof.Dr.Yaowapa Lorjaroenphon
27. Asst.Prof.Dr.Ronnarit Rittiron
28. Asst.Prof.Dr.Wannasawat Ratphitagsanti
29. Assoc.Prof.Dr.Wannee Jirapakkul
30. Asst.Prof.Dr.Walairut Chantarapanont
31. Mr.Watcharaphong Leartsurawat
32. Dr.Vipa Surojanametakul
33. Asst.Prof.Dr.Withida Chantrapornchai
34. Assoc.Prof.Dr.Weerachet Jittanit
35. Dr.Siwaporn O'Charoen
36. Dr.Sawitree Dueramae
37. Dr.Sichaya Sittipod
38. Asst.Prof.Dr.Sirichai Songsermpong
39. Assoc.Prof.Dr.Sudsai Trevanich
40. Dr.Sudathip Sae-tan
41. Asst.Prof.Dr.Suttipun Keawsompong
42. Assoc.Prof.Dr.Suntaree Suwonsichon
43. Miss Supakchon Klongdee
44. Dr.Suvimol Charoensiddhi
45. Assoc.Prof.Dr.Saowanee Lertworasirikul
46. Dr.Hataichanok Kantrong
47. Assoc.Prof.Dr.Hathairat Rimkeeree
48. Dr.Aussama Soontrunnarudrungsri

Subject: Argo-Industry (External)

1. Asst.Prof.Dr. Kitipong Assatarakul
2. Asst.Prof.Dr. Kiattisak Duangmal
3. Asst.Prof.Dr. Jirawan Apiraksakorn
4. Assoc.Prof.Dr.Jirarat Anuntagool
5. Dr.Chutha Takahashi Yupanqui
6. Assoc.Prof.Dr.Chumpol Monthatipkul
7. Assoc.Prof.Dr.Thananya Wasusri
8. Asst.Prof.Dr. Bootsrapa Leelawat
9. Assoc.Prof.Dr.Pravate Tuitemwong
10. Assoc.Prof.Dr.Prapasri Theprugsa
11. Asst.Prof.Dr.Prasan Swatsitang
12. Asst.Prof.Dr.Parinda Penroj

13. Asst.Prof.Dr.Parita Thanasukarn
14. Asst.Prof.Dr.Piyaporn Chueamchaitrakun
15. Asst.Prof.Dr.Pitchaon Maisuthisakul
16. Asst.Prof.Dr.Pisit Dhamvithee
17. Assoc.Prof.Dr.Yuthana Phimolsiripol
18. Asst.Prof.Dr.Racha Tepsorn
19. Asst.Prof.Dr.Romanee Sanguandeekul
20. Dr.Rutrada Theppradit
21. Assoc.Prof.Dr.Waranyou Sridach
22. Assoc.Prof.Dr.Walailak Atthirawong
23. Dr.Wilailuk Chaiyasit
24. Asst.Prof.Dr.Sirinun Keanthong
25. Asst.Prof.Dr.Sompoche Pojjanapimol
26. Dr.Suteera Vatthanakul
27. Assoc.Prof.Dr.Adisorn Swetwiwathana
28. Asst.Prof.Dr.Orn-In Prachaiyo

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ดร.ภัทรา เพ่งธรรมกีรติ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
2. รศ.ดร.ลดาวัลย์ พวงจิตร	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
3. รศ.ดร.สันต์ เกตุปราณีต	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
4. รศ.ดร.สามัคคี บุณยะวัฒน์	คณะสิ่งแวดล้อม
5. รศ.ดร. รองลาภ สุขมาสรวง	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
6. ผศ.ดร.นิตยา เมี้ยนมิตร	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
7. ผศ.ดร.รัชนี โพธิแท่น	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
8. ผศ.ดร.นฤมล แก้วจำปา	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
9. ผศ.ดร.สมนิมิตร พุกงาม	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
10. ผศ.ดร.ปิยพงษ์ ทองดีนอก	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
11. ผศ.ดร.อรอนงค์ ผิวนิล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
12. ผศ.ดร.แสงสรรค์ ภูมิสถาน	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
13. ผศ.ดร.นิสา เหล็กสูงเนิน	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
14. ผศ.ดร.ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
15. ผศ.ดร.วิรงรอง ดวงใจ	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
16. ผศ.ดร.ออ พรานไชย	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
17. ผศ.ดร.กอบศักดิ์ วันธงไชย	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
18. ผศ.ดร.นพรัตน์ คัคคุริวาระ	ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์
19. ผศ.ดร.พยัตติพล ณรงคะชวนะ	ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์
20. ดร.ยุทธพงษ์ คีรีมังคละ	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
21. ดร.พรเทพ เหมือนพงษ์	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
22. ดร.พิชิต ลำใย	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
23. ดร.ยุทธพงษ์ คีรีมังคละ	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์

24. ดร.อุษารดี ภู่มาลี ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์

25. ดร.วรงค์ สุขเสวต ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. รศ.ดร.ดุสิต เวชกิจ สาขาส่งเสริมการเกษตรและสหกรณ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
2. รศ.ดร.รัตนวัฒน์ ไชยรัตน์ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
3. รศ.ดร.ชุลีมาศ บุญไทย อิวาย สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
4. ผศ.ดร.ปิยะพงษ์ จันทร์ใหม่มูล คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเมคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
5. ผศ.ดร.ปิยะกาญจน์ เที้ยธิทรัพย์ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
6. ดร.รัฐกร สืบคำ กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิต ทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร
7. ดร.สุรัสสวดี จามิกรณ์ กลุ่มวิชาพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ (เคมี) และคณิตศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
8. ดร.สุธิดา ทีปรักษพันธุ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
9. ดร.ศุภพัชรี ธนสารไพบูลย์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
10. ดร.พรทิพย์ โพนตุแสง สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
11. ดร.อนงนาฏ ศรีประโชติ สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
12. ดร.แอนนา เขียวชอุ่ม บริษัท บ้านปู จำกัด (มหาชน)
13. ดร.สิทธิศักดิ์ หมูคำหล้า สถาบันวิทยาการอวกาศและภูมิสารสนเทศ (GISTDA Academy) สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)
14. ดร.โกมล แพรกทอง สมาคมศิษย์เก่าวนศาสตร์
15. นายสุกิจ จันทร์ทอง องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้
16. นายฉานฉลาด บุนนาค 3M Thailand

Editorial Board

Subject: Natural Resources and Environment (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Patthra Pengthamkeerati
2. Assoc.Prof.Dr. Laddawan Puangchit
3. Assoc.Prof. Dr.San Kaitpraneet
4. Assoc.Prof.Dr.Samakkee Boonyawat
5. Assoc.Prof.Dr.Ronglarp Sukmasuang
6. Assist.Prof.Dr.Nittaya Mianmit
7. Assist.Prof.Dr.Rachanee Pothitan
8. Assist.Prof.Dr.Naruemol Kaewjampa
9. Assist.Prof.Dr.Somnimirt Pukngam
10. Assist.Prof.Dr.Piyapong Tongdeenok
11. Assist.Prof.Dr.Onanong Phewnil
12. Assist.Prof.Dr.Sangsan Phumsathan
13. Assist.Prof.Dr.Nisa Leksungnoen
14. Assist.Prof.Dr.Prapaipid Chairattanamanokorn
15. Assist.Prof.Dr.Wirongrong Duangjai
16. Assist.Prof.Dr.Aor Pranchai
17. Assist.Prof.Dr.Kobsak Wanthongchai
18. Assist.Prof.Dr.Nopparat Kaakurivaara
19. Assist.Prof.Dr.Payattipol Narangajavana
20. Dr.Yutthaphong Kheereemangkla
21. Dr.Ponthep Meunpong
22. Dr.Pichit Lumyai
23. Dr.Yutthaphong Kheereemangkla
24. Dr.Usaradee Phumalee
25. Dr.Warong Suksavate

Subject: Natural Resources and Environment (External)

1. Assoc.Prof.Dr.Dusit Wechakit
2. Assoc.Prof.Dr.Rattanawat Chaiyarat
3. Assoc.Prof.Dr.Chuleemas Boonthai Iwai
4. Assist.Prof.Dr.Piyapong Janmaimool
5. Assist.Prof.Dr.Piyakarn Teartisup
6. Dr.Ratgon Suebkam
7. Dr.Surassawatee Jamikorn
8. Dr.Suthida Theepharaksapan
9. Dr.Supatcharee Tanasarnpaiboon
10. Dr.Porntip Phontusang
11. Dr.Anongnat Sriprachote
12. Dr.Anna Kiewchaum
13. Dr.Sitthisak Moukomla
14. Dr.Komon Prakthong
15. Mr.Sukit Junghong
16. Mr.Chanchalad Bunnag

กรรมการฝ่ายจัดทำเอกสารทางวิชาการ

1.	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภา มหากาญจนกุล)	ที่ปรึกษา
2.	รองผู้อำนวยการฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ดร.วราพรรณ อภิศุภะโชค)	ประธานกรรมการ
3.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ธร ศศิธนากรแก้ว	กรรมการ
4.	นางสาวดลฤทัย เจียรกุล	กรรมการ
5.	ว่าที่ร้อยตรี ปิยะภัทร คงแสนคำ	กรรมการ
6.	นางสาววนิดา รัตตมณี	กรรมการ
7.	นางสาวทิสยา ทิศเสถียร	กรรมการ
8.	นายวิทวัส ยุทธโกศา	กรรมการ
9.	นายประเสริฐ กล่อมฤกษ์	กรรมการ
10.	นางสาวศุภิสรา เกียรติสันติสุข	กรรมการ
11.	นายธีรศักดิ์ สุนทรา	กรรมการ
12.	นายนันทิศักดิ์ ประทีปสุข	กรรมการ
13.	นางสาวรัตนาภรณ์ ไชยแสน	กรรมการ
14.	นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร	กรรมการและเลขานุการ
15.	นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
16.	นางสาวพัชราภา รัตนวิญญูภิรมย์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

จัดทำโดย สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

KURDI
Kasetsart University
Research and Development Institute

“มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เป็นสถาบันที่มีปณิธานมุ่งมั่นในการสั่งสม เสาะแสวงหา
และพัฒนาความรู้ให้เกิดความเจริญงอกงามทางภูมิปัญญา
ที่เพียบพร้อมด้วยวิชาการ จริยธรรม และคุณธรรม
ตลอดจนเป็นผู้ชี้นำทิศทาง สืบทอดเจตนารมณ์ที่ดีของสังคม
เพื่อความคงอยู่ ความเจริญ
และความเป็นอารยะของชาติ”

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ร่วมกับ
กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
กระทรวงศึกษาธิการ
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม
สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ฝ่ายเลขานุการคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 58
สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: kuannualconf@gmail.com
Website: http://annualconference.ku.ac.th, http://www.rdi.ku.ac.th