เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 56 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of The 56th KU ANNUAL CONFERENCE

Agricultural Science: Moving towards Creative Economy

ศาสตร์เกษตรสู่เศรษฐกิจสร้างสรรค์

KU KASETSART UNIVERSITY

SCIENCE TECHNOLOGY and ENVIRONMENT

สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม
Science and Genetic Engineering
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
Architecture and Engineering
สาขาอุตสาหกรรมเกษตร
Agro-Industry
สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
Natural Resources and Environment

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 56 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of the 56th Kasetsart University Annual Conference

เล่มที่ 2

สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม

(Subject: Science and Genetic Engineering)

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

(Subject: Architecture and Engineering)

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Subject: Agro-Industry)

และสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources and Environment)

จัดโดย (Organized by)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University)

ร่วมกับ (in cooperation with)

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (Commission of Higher Education)

กระทรวงศึกษาธิการ (Ministry of Education)

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Ministry of Agriculture and Cooperatives)

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (Ministry of Science and Technology)

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Ministry of Natural Resource and Environment)

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม (Ministry of Digital Economy and Society)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (National Research Council of Thailand)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (The Thailand Research Fund)

30 มกราคม - 2 กุมภาพันธ์ 2561 (January 30 – February 2, 2018)

ISBN 978-616-278-434-7

คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ได้จัดให้มีการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๕๖ ระหว่างวันที่ ๓๐ มกราคม - ๒ กุมภาพันธ์ ๒๕๖๑ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างและพัฒนาคุณภาพของงานวิจัย และเผยแพร่ความรู้ความก้าวหน้าทางด้านวิชาการและเทคโนโลยี ตลอดจนเป็นการแลกเปลี่ยนความรู้และระดมความคิดเห็นระหว่างนักวิชาการ อันจะนำไปสู่แนวทางการสร้างผลงานวิจัยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศชาติต่อไป

เอกสารฉบับนี้รวบรวมเรื่องเต็มผลงานวิจัยภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทั้งภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ของ **สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม จำนวน ๒๑ เรื่อง สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ จำนวน ๔๗ เรื่อง สาขาอุตสาหกรรมเกษตร จำนวน ๓๘ เรื่อง และสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จำนวน ๑๖ เรื่อง** ซึ่งได้ผ่านการคัดเลือกจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขา และนำเสนอในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๕๖

ในนามของคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๕๖ ขอขอบคุณ นักวิจัย นักวิชาการ คณาจารย์ที่ได้นำผลงานมาเสนอ และผู้ที่สนใจเข้าร่วมการประชุมทางวิชาการในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกฝ่ายที่สละเวลา แรงกาย แรงใจและความคิด ร่วมมือกันจัดเตรียมการประชุม จนทำให้การประชุมทางวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

(รองศาสตราจารย์ ดร.ลดาวัลย์ พวงจิตร)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๕๖

ความสมบูรณ์ของการเสนอผลงาน ในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 56 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประกอบด้วย หนังสือรับรองการมาเสนอผลงาน และการได้ตีพิมพ์ลงในเรื่องเต็มฉบับสมบูรณ์

เอกสารทางวิชาการ 6/2561

ฝ่ายบริการการศึกษา สำนักทะเบียนและประมวลผล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. 0-2118-0145 โทรสาร 0-2118-0145

E-mail: annualconference@ku.ac.th

สารบัญ

สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม (Subject: Science and Genetic Engineering)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. วท.พว.1/O246 ปริมาณฟีนอลิกรวม ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของส่วนสกัดจากโสน.....1

Total Phenolic, Antioxidant, and Antibacterial Activities of *Sesbania javanica* Miq. Extract

โดย ปิยะดา พันธุ์สระน้อย ชัชวิน เพชรเลิศ และวิสาตรี คงเจริญสุนทร

2. วท.พว.3/O67 Evaluation of Radiological Hazard Impact in Ao Noina at Koh Samet in Rayong Province (Thailand) after the Oil Spill Disaster in Gulf of Thailand on 27 July, 2013.....9

By Prasong Kessaratikoon Nikom Choosiri Ruthairat Boonkrongcheep and Udorn Youngchauy

3. วท.พว.4/O68 การศึกษาพื้นผิวของแมงกานีสออกไซด์และโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ที่เคลือบบนเม็ดเซรามิก.....17

Surface Study of Manganese Oxides and Iron-based Metal-organic Frameworks Coated on Ceramic Balls

โดย นิชาภา สุพรรณฝ่าย จักรภพ พันธศรี วิษณุ แทนบุญช่วย มงคลชัย อัศวดิษฐเลิศ และภุมรินทร์ คำเดชศักดิ์

4. วท.พว.9/O122 Comparative Phytochemistry of *Gonocaryum lobbianum* (Miers) Kurz (Cardiopteridaceae) and Its Bioactivity.....25

By Kongkidakorn Thaweepanyaporn Nuttha Sanevas and Srunya Vajrodaya

5. วท.พว.10/O83 Evaluation of the Stability and Sensitivity of Quartz Crystal Nanobalance for Detection of Organic Molecule Adsorption..... 33

By Naray Pewnim and Wanatchaporn Arunmanee

6. วท.พว.21/O233 ผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันต่อการงอกเมล็ดและการเจริญเติบโตของต้นกล้าไมยราบยักษ์.....40
Effect of Sunflower Pericarp Aqueous Extract on *Mimosa pigra* L.
โดย ณัฐพล สุนทรโชติ อรอุษา คำสุข และศรีสม สุวรรณวงศ์

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. วท.พว.2/P7 Nitrate, Cadmium and Lead Content in Some Fresh Vegetables..... 51
By Siriwan Soiklom Wipada Siri-anusornsak and Krittaya Petchpoung
2. วท.พว.5/P50 Isolation and Identification of Marine Yeasts Antagonize *Vibrio parahaemolyticus* Causing Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease.....57
By Chakhriya Chalad Varaporn Vuddhakul and John Mekalanos
3. วท.พว.6/P51 องค์ประกอบทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดตำรับประสะไพล
Chemical Composition and Biological Activities of Prasaplai Extract.. 65
โดย สุพนิดา วินิจฉัย นัดดามาศ โตมอญ ภารดี อสุโกวิท วราวุฒิ ศุภมิตรมงคล ชลลดา บุราชรินทร์ และพัลลภา วุฒิภาพรกุล
4. วท.พว.7/P52 การประกันคุณภาพการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในน้ำประปา.....72
Quality Assurance for Gross Alpha and Gross Beta Measurement in Tap Water
โดย สุนทรี แก้วผลึก ทัศนีย์ สายเงิน และยุทธนา ตุ้มน้อย
5. วท.พว.8/P173 การถอดความและทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของตำรับยาโบราณที่จารึกไว้ในคัมภีร์ใบลาน.....80
Translation and Antioxidant Activity of the Drug Ancient Texts from Scripture Inscribed on Bai Lan
โดย ศรัญญา มณีทอง สุพัทรา แตงทับทิม และพิพัฒน์ ประเสริฐสังข์

6. วท.พว.11/P174 A Newly Isolated Halophilic Anaerobic Bacterium that Producing β-Glucosidase, *Halanaerobium praevalens* Strain SP3-14 from Saltern Ponds..... 88

By Sobroney Heng Chakrit Tachaapaikoon Patthra Pason Rattiya Waeonukul Sirilak Baramee Akihiko Kosugi Prattana Ketbot Sreyneang Nhim Waraporn Apiwatanapiwat and Khanok Ratanakhanokchai

7. วพ.พว.12/P94 การย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้อากาศของกากตะกอนและตะกอนไขมันจากระบบบำบัดน้ำเสีย..... 96

Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Fat Sludge

โดย กรประภา กาญจนะ ศุภกิจ ศรีสวัสดิ์ ภิญญาพัชญ์ บุญครอง กิตติ จำจด และโศภณ พวงจันทร์

8. วท.พว.13/P104 ฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ของราเอนโดไฟท์ที่แยกจากมะเม่าและโคลงเคลงในพื้นที่ป่าพรุควนเคร็ง..... 104

Antimicrobial Activity of Endophytic Fungi Isolated from *Antidesma velutinosum* Blume and *Melastoma malabathricum* L. at Kuankreng Peatlans

โดย สุมาลี เลี่ยมทอง แน่งน้อย แสงเสน่ห์ และโสภนา วงศ์ทอง

9. วท.พว.14/P105 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมีของสาหร่ายวากาเมะเค็มระหว่างการเก็บรักษา..... 113

Change of Physical and Chemical Characteristics of Salted Wakame (*Undaria pinnatifida*) during Storage

โดย ทิพยา สิทธิทูล และวริพัสย์ อารีกุล

10. วท.พว.15/P137 การวิเคราะห์ตัวอย่างทางธรณีวิทยาแบบไม่ทำลายตัวอย่างเพื่อใช้ประกอบการสืบสวนทางนิติวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์..... 120
Non-destructive Analysis in Geological Samples for Investigation on Various Aspects of Nuclear Forensics
โดย ลฎาภา ศรีจิตตะวา อารีรักษ์ เรือนเงิน หริเนตร มุ่งพยาบาล และธงชัย สุดประเสริฐ

11. วท.พว.16/P175 การใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัดเซริซินจากรังไหมร่วมกับการใช้สารสกัดจากใบหม่อนเป็นตัวทำละลายในการสกัด ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม..... 128
Ultrasound-assisted Extraction of Sericin from Silk Cocoon Combined with Mulberry Leaves Extracts Solvent as an Environmentally Friendly Process
โดย ธัญพรรณ ฮ่อบรรทัด

12. วท.พว.18/P142 การประเมินศักยภาพของราเอนโดไฟต์และราจากดินที่ทนต่อสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนคลอรีนในการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญของพืช..... 137
Evaluation of Plant Growth Promoting Potential of Organochlorine Pesticide Resistant Endophytic and Soil Fungi
โดย จันทร์แรม รูปขำ ธนภูมิ มณีบุญ และศิริวัลย์ สร้อยกล่อม

13. วท.พว.20/P146 การคัดแยกแอคติโนมัยซีทที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากบ่อน้ำพุร้อนทุ่งนุ้ย จังหวัดสตูล..... 144
Isolation of Cellulase Producing Actinomycetes from Thung Nui Hot Spring, Satun Province
โดย สายใจ วัฒนเสน สุโรจนา ยานา และพาซีล๊ะ ฮามะ

14. วท.พว.22/P159 The Convenient Method for Synthesis of Crenatine; an Antimalarial Agent of *Picrasma spp*..... 152
By Chalerm Saiin Busaban Sirithunyalug Apiwat Baramee Kiyosei Takasu and Masataka Ihara

15. วท.พว.23/P161 Standard Karyotypes of Four Species of Bufonid Frogs (Anura : Bufonidae) from Thailand.....160
By Thavorn Supaprom Thitipong Panthum Kannika Pratoompak and Kaew Udomsirichakorn

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ (Subject: Architecture and Engineering)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. สถ.วศ.1/O6 การออกแบบใบพัดลมระบายความร้อนแบบไหลตามแนวแกนแบบสามใบพัดสำหรับเครื่องปรับอากาศโดยวิธีการออกแบบการทดลอง..... 171
Design of Axial-Flow Cooling 3-Fan in Air Conditioner Based on DOE Method
โดย กิตติเชษฐ์ สุวรรณวัฒน์ พัชราภรณ์ ญาณภิรัต และศันสนีย์ สุภาภา

2. สถ.วศ.2/O8 การศึกษาประสิทธิภาพของตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาเพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....181
The Efficiency of Water Supply Sludge for Carbon Dioxide Gas Removal
โดย นิศารัตน์ ใจยศเส้า พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ และสุชีลา พลเรือง

3. สถ.วศ.3/O9 คุณสมบัติทางกลของวัสดุประกอบจากเส้นใยปอสำหรับใช้ในงานซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต.....189
Mechanical Properties of Composite from Jute Fiber for Repair and Strengthening of Concrete Structures
โดย ปริมประภา ระมั่งทอง และจักรพันธ์ เทือกต๊ะ

4. สถ.วศ.4/O10 การลดความเค้นหนาแน่นของแผ่นกึ่งอนันต์มีรูวงกลมเดียวอยู่ใกล้ขอบภายใต้ภาระดึงโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....197
The Reduction of Stress Concentration of a Semi-infinite Plate with a Circular Hole Near the Edge Under Tension Load Using Finite Element Method
โดย วัชระ เครือรัฐติกาล สุทธิพงษ์ สะอาดเอี่ยม และนภัสพร บูรพาวัลย์

5. สถ.วศ.5/O14 ประสิทธิภาพของเทคนิคเพื่อปกป้องรอยต่อระหว่างคอนกรีตและวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... 205
Effectiveness of Protective Techniques for Concrete/FRP Bond Joints
โดย ปรมินทร์ เห็นชอบ และจักรพันธ์ เทือกต๊ะ
6. สถ.วศ.6/O18 ผลกระทบจากเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำสะกอมต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง..... 214
Impacts of Jetty on Shoreline Change around Sakom River Mouth
โดย รัฐพล รุ่งโรจน์เจริญผล และสมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง
7. สถ.วศ.7/O24 Anoxic Process for Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Contaminated Kaohsiung Harbor Sediment..... 222
By Peerada Subannarat Chia-Yuan Chang Cheng-Di Dong Dome Adoonsook and Chart Chiemchaisri
8. สถ.วศ.8/O29 Aerobic Process for Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Contaminated Harbor Sediment..... 230
By Sudarat Jaisaard Cheng-Di Dong Chia-Yuan Chang Chart Chiemchaisri and Dome Adoonsook
9. สถ.วศ.9/O30 Removal of Heavy Metals from Harbor Sediment by Bioleaching Process..... 238
By Phakchira Klipkhayai Chia-Yuan Chang Shen-Yi Chen Dome Adoonsook and Chart Chiemchaisri
10. สถ.วศ.10/O32 การพัฒนารูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่าง เพื่อการส่องสว่างที่เหมาะสมสำหรับห้องเรียนของโรงเรียนมัธยม..... 246
The Development of Light Guiding Shade System for Appropriate Illumination in Classroom of Secondary School
โดย ณัฏฐ์ธมล พุ่มจันทร์ นวลวรรณ ทวยเจริญ และศิรเดช สุริต

11. สถ.วศ.13/O46 ปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่..... 254
Factors Affecting the Success of Large Scale Construction Projects
โดย ชัยชนะ ชิดช่วงชัย สุธาริน สถาปิตานนท์
และวิโรจน์ รุโจปการ
12. สถ.วศ.14/O48 การผลิตอนุภาคโคคริสตอลระหว่างยาเมเฟนามิคแอซิด
กับยาพาราเซตามอลด้วยกระบวนการ Gas Anti-Solvent (GAS)..... 263
Production of Mefenamic Acid-Paracetamol Cocrystals using
Gas Anti-Solvent (GAS) Process
โดย นภาดา วิเชียรพงษ์ และมานพ เจริญไชยตระกูล
13. สถ.วศ.15/O49 การศึกษาทัศนคติและพฤติกรรมการจัดการขยะก่อสร้างของผู้รับเหมา
ในประเทศไทย..... 271
A Study on the Contractor's Attitude and Behavior of Construction
Waste Management in Thailand
โดย ตรีทิพย์ ประทุมมณี และปิยนุช เวทย์วิวรณ์
14. สถ.วศ.16/O54 ผลของอุณหภูมิและแอมโมเนียต่อระดับสุขภาพปะการัง กรณีศึกษา
ปะการังโขด เกาะสีชัง ประเทศไทย.....279
The Effects of Temperature and Ammonia to Coral Health Level:
A Case Study of Hump Coral *(Porites sp.)* at Sichang Island,
Thailand
โดย บุษปกรณ์ อุดมทรัพย์ เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ
และสมภพ รุ่งสุภา
15. สถ.วศ.18/O57 การศึกษาอิทธิพลของหิ้งแสงต่อปริมาณความส่องสว่างของห้องเรียน
กรณีศึกษาอาคารเรียนคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร..... 287
The Effect of Light Shelf on the Illumination of the Classroom:
A Case Study of Faculty of Humanities and Social Sciences
Phranakhon Rajabhat University
โดย พรรณวดี โรจนศิริ นวลวรรณ ทวยเจริญ
และศิรเดช สุริต

16. สถ.วศ.19/O78 การจำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกนิรภัยแบบเต็มใบเปิดหน้า
สำหรับผู้ใช้รถจักรยานยนต์บริเวณด้านหน้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 295
Simulation of an Impact Test of an Open Face Motorcycle Helmet
at the Frontal Area by Finite Element Method
โดย ฐาปน์กร ไชยคำภา และเอกชัย ชัยชนะศิริ
17. สถ.วศ.22/O106 การตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
เนื่องจากคาร์บอเนชันของทางพิเศษ..... 303
Inspection of Expressway Reinforce Concrete Structures
Deteriorated by Carbonation
โดย ประภากร สำราญกิจ และวันชัย ยอดสุดใจ
18. สถ.วศ.23/O110 การศึกษาความพรุนของกระเปาะเซรามิกเพื่อออกแบบเซนเซอร์
วัดความชื้นดินและอุณหภูมิดิน.....311
A Study of Porosity of Ceramic Bulbs for Design Soil Moisture and
Soil Temperature Sensors
โดย ปริยานุช ยวงใย และทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์
19. สถ.วศ.24/O120 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการใช้น้ำประปากับอุณหภูมิในพื้นที่
ให้บริการของการประปานครหลวง.....319
Relationship between Potable Water Demand and Temperature
in Service Area of Metropolitan Waterworks Authority
โดย ฌินาพรรณ์ เมฆไพบูลย์ อดิชัย พรพรหมินทร์
สุรชัย ลิปิวัฒนาการ เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล
ยุทธนา ตาละลักษมณ์ ดนย์ปภพ มะณี และณัฐ มาแจ้ง
20. สถ.วศ.25/O121 การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ทำให้เกิดของเสียในการก่อสร้างอาคาร
ขนาดใหญ่..... 326
Correlational Study of Waste Generation Factors from Large Building
Construction Project
โดย เทอดศักดิ์ มุนีนารถ ศิรเดช สุริต
และนวลวรรณ ทวยเจริญ

21. สถ.วศ.28/O142 การศึกษาความสึกหรอของล้อรถไฟแบบ Vidura ของการรถไฟแห่งประเทศไทย..... 335
Study of Wear of Vidura Railway Wheel Profile of State Railway of Thailand
โดย รัชชานนท์ อภิญญายรรยง ธนา ภู่เผือกรัตน์ สิทธิพงษ์ พรหมลา และวิชัย ศิวะโกศิษฐ
22. สถ.วศ.29/O147 การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีต่อระบบไฟฟ้า..... 342
Impact Study on Harmonics From Industrial Factory to Power Systems
โดย ณัฐพงษ์ สินประกอบ และกฤติเดช บัวใหญ่
23. สถ.วศ.31/O159 การประเมินความเสี่ยงจากกระบวนการทำลายอุปกรณ์ของถุงลมและเข็มขัดนิรภัยในรถยนต์..... 349
Risk Assessment of Destructive Process of Airbag and Seat Belt in Automobiles
โดย สิทธา ธงไชย และดวงฤดี ฉายสุวรรณ
24. สถ.วศ.33/O169 การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลสัตว์.....357
Study of Biogas Production from Napier Grass Juice with Animal Waste
โดย สิริญญา เพียรวิริยพงษ์ พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ และสุชาติ เหลืองประเสริฐ
25. สถ.วศ.34/O179 พัฒนาการสัณฐานของปืนเล็กยาวจู่โจม..... 365
Physical Development of Assault Rifle
โดย ชวาน พรรณดวงเนตร
26. สถ.วศ.35/O184 การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกต่อการใช้แสงธรรมชาติภายในอาคารสำนักงาน..... 373
The Study of the Effect of Characteristic of Anidolic Lighting System on Daylighting in Office Buildings
โดย เจษสุภา หมั้นทรัพย์ นวลวรรณ ทวยเจริญ และศิรเดช สุริต

27. สถ.วศ.36/O189 การพัฒนา SMEs ด้านโลจิสติกส์การเกษตรสู่การเป็นเศรษฐกิจสีเขียว (กรณีศึกษาผู้ประกอบการผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า: กลุ่มจังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน 1)……..... 381
Development of SMEs of Agricultural Green Logistics for Green Economy (A Case Study of Fabric-Textile Enterprises: Upper North-Eastern Province Cluster 1)
โดย ณัชชา สมจันทร์ และภควดี ศิริหล้า
28. สถ.วศ.38/O197 การศึกษาการไหลวนของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุที่หยุดนิ่งและเคลื่อนที่..... 389
An Investigation of Wake behind Stationary and Moving Objects
โดย ภูริต กิ่งรุ้งเพชร์ และชวลิต กิตติชัยการ
29. สถ.วศ.39/O198 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์สู่รถไฟฟ้าและระยะทางเข้าถึงสถานี: กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีแดง สถานีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์……..... 398
Relationship between Modal Shift Decisions from Road to Rail and Station Access Distances: A Case Study of Red Line Commuter Line Kasetsart University Station
โดย คุณาธิป หวานเสร็จ เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล และวิโรจน์ รุโจปการ
30. สถ.วศ.40/O201 การตรวจสอบสารตั้งต้นไตรฮาโลมีเทนในระบบผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน……..... 406
Investigation of Trihalomethanes Precursors in Water Treatment Process of Bangkhen Water Treatment Plant
โดย คุณานนต์ งามถ้อย ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา และสุชาติ เหลืองประเสริฐ
31. สถ.วศ.41/O208 Performance of High-rate Membrane Bioreactor for the Treatment of Polluted Canal Water: Effect of Sponge Media……..……..414
By Davin Sang Chart Chiemchaisri and Wilai Chiemchaisri

32. สถ.วศ.42/O209 ผลของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ต่อสมรรถนะของปฏิกิริยาการแตกตัวน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งในปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดชนิดไหลเวียนลง…….....422
Effect of Hydrodynamics Behavior on the Performance of Catalytic Cracking of Heavy Oil in Co-Current Downflow Circulating Fluidized Bed Reactor
โดย สุภาวดี ราชสมบัติ สุนันท์ ลิ้มตระกูล
เทอดไทย วัฒนธรรม และปริญญา คงพรม
33. สถ.วศ.43/O213 การศึกษาความเป็นไปได้การใช้ประโยชน์จากพื้นที่หลังคา/ดาดฟ้าของอาคารปัจจุบันภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....430
Feasibility Study: Utilization of Roof Area on Existing Buildings, Faculty of Engineering, Kasetsart University
โดย รำพูน สมมโนนัย และจีมา ศรลัมพ์
34. สถ.วศ.45/O220 การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้หลาวชะโอน..... 438
Study of the Influence of Cutting Parameters on Surface Roughness in Turning of Oncosperma Tigillarium Wood
โดย สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ จักรนรินทร์ ฉัตรทอง
จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล และวรรธนพร ชีววุฒิพงศ์
35. สถ.วศ.49/O224 การศึกษากำลังตามแนวแกนของเสาท่อเหล็กประกอบ 3 ท่อ โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์…….....446
The Study of Axial Strength of The Built-up 3 Tube Columns Using Finite Element Analysis
โดย ณัฐกิตติ์ ดำรงอุตสาหกิจ และกิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ
36. สถ.วศ.50/O229 การพัฒนาระบบการตรวจสอบ และบำรุงรักษาตามความเสี่ยงสำหรับท่อและอุปกรณ์บนแท่นพักท่อในทะเล…….. 455
Risk Based Inspection System Development for Piping and Equipment on Riser Platform
โดย นวสิน หอมหวล กฤษ วงษ์เกษม
และเลิศชัย ระตะนะอาพร

37. สถ.วศ.51/O230 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์เสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเพื่อออกแบบให้เหมาะสมโดยภาษาพีเอชพีไฮเปอร์เท็กซ์พรีโปรเซสเซอร์..... 463
Development of A Program for Analysis of A Transmission Line Tower for Optimization Design by Using PHP Hypertext Preprocessor Language
โดย เสรี องคะสุวรรณ และสมโพธิ์ วิวิธเกยูรวงศ์

38. สถ.วศ.53/O239 กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบต้นทุนต่ำโดยใช้เส้นใยมะพร้าวอ่อนทดแทนแร่ใยหิน.....473
Low Cost Fibre-Cement Flat Sheets by Young Coconut Fibers Replaced Asbestos
โดย ประชุม คำพุฒ

39. สถ.วศ.54/O240 ผลของอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์และอัตราเวียนสารละลายเหล็กต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการแบบผสมทางเคมีและชีวภาพ..... 481
Effect of Hydrogen Sulfide Loading Rates and Iron Solution Circulation Rates on Efficiency of Hydrogen Sulfide Removal from Biogas by Hybrid Chemical and Biological Process
โดย จารุกร ดวงแก้ว และปฏิรูป ผลจันทร์

40. สถ.วศ.55/O241 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารยับยั้ง.....490
Corrosion of Reinforcement in Concrete mixed with Corrosion Inhibitors
โดย เมทิดา แก้วพันธ์ และวันชัย ยอดสุดใจ

41. สถ.วศ.56/O242 การออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดขนาดปลากะตักแห้ง..... 499
Design and Development of Dried Anchovy Sizing Machine
โดย อำนาจ คูตะคุ และเอกสิทธิ์ ศรีธรรม

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. สถ.วศ.11/P171 การศึกษาสัดส่วนการเลือกรูปแบบการเดินทางระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้ากรณีศึกษา: รถไฟฟ้าสายสีเขียวสถานีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....509

The Study of Transportation Modal Choice Decisions between Private Car and Mass Rapid Transit: A Case Study of Green Line Sky Train, Kasetsart University Station

โดย ณัฐชนน อัตตาภิบาล เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล ชวเลข วณิชเวทิน และวิโรจน์ รุโจปการ

2. สถ.วศ.12/P15 การประยุกต์ใช้ข้อมูลตรวจวัด NO_2 ด้วยเซ็นเซอร์ดาวเทียม OMI ในประเทศไทย..... 516

Application of NO_2 Monitoring Data by OMI Satellite Sensor in Thailand

โดย เบญจพร ปานเกิด พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ มณฑล ฐานุตตมวงศ์ และพิชญ์นรี ลลิตาภรณ์

3. สถ.วศ.17/P40 ผลของสารเติม Mn^{2+} and Fe^{2+} ที่มีต่อการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียและการเกิดผลิตภัณฑ์ของแข็งระหว่างการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้น้ำทะเลผสมแอมโมเนีย..... 524

Effect of Mn^{2+} and Fe^{2+} Additives on Ammonia Suppression and Solid Product Formation during CO_2 Capture using Ammoniated Seawater

โดย สุภาพร ผลิตสกุล ธีรภัทร์ ยงชูยศ พศวัต ศรีสันต์ และกานดิส สุดสาคร

4. สถ.วศ.20/P62 การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงชุดโครงสร้างกระบะของเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 532

A Design and Analysis of Strength of Bin of Grapple Log Loader Tool by Finite Element Method

โดย ศุภัชฎา หาญชนะ ศุภกิตติ์ สายสุนทร และนพรัตน์ คัคคุริวาระ

5. สถ.วศ.30/P91 Informal Active Learning Space: Students form Their Favorable Space……...540
By Thanyaporn Janma
6. สถ.วศ.37/P172 การติดตามการเจริญเติบโตของนาข้าวด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ..... 548
Monitoring of Rice Growth with UAV-Derived Aerial Imagery
โดย ศิวา แก้วปลั่ง พรหมชัย สุพรรณ ธนัช เอกเกื้อกูล และเนติ ศรีหานู

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Subject: Agro-Industry)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. อก.9/O41 Hydrolysis of Napier Grass in Leach Bed Reactor for Methane Production: Effects of Biological Pretreatment and Leachate Temperature……557
By Sutinee Lowattanatakul Wanna Choorit and Yusuf Chisti
2. อก.14/O84 Production of Mechanical Pulp from Oil Palm Frond……...565
By Jarawee Leksuksri Nikhom Laemsak and Phichit Somboon
3. อก.21/O107 ผลของการเติมไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูงต่อสมบัติของไขมันทดแทนเนยโกโก้ชนิดไขมันลอริค.....573
Effect of High Melting Fat Addition on Properties of Cocoa Butter Substitute
โดย ภัทราภรณ์ อินทร์บำรุง และโสภาค สอนไว
4. อก.23/O109 Characterisation of Anaerobically Treated Molasses Wastewater from Ethanol Production Plants …….. 581
By Chanita Phromkeeree and Nuttakan Nitayapat

5. อก.28/O185 ผลของช่องระบายอากาศต่อความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูก ขนาดมิติฐานมาตรฐาน..... 589
Effect of Vent Design on Box Compression Strength of Corrugated Common Footprint
โดย รชยา ธชเสถียร และเลอพงศ์ จารุพันธ์

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. อก.1/P9 ผลการทดแทนเกลือด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์และไกลซีนต่อคุณภาพของข้าวเกรียบซูริมิ..... 601
Effect of Salt Substitution with Potassium Chloride and Glycine on Quality of Surimi Cracker
โดย ศรันยา บุญมาเลิศ และเสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล

2. อก.2/P11 การพัฒนาหมูยอเสริมเส้นใยจากเซลลูโลสแบคทีเรีย..... 609
Development of Mou-Yaw (Boiled Pork Sausage) Supplemented with Fiber Bacterial Cellulose
โดย สะไบ ลีลาพีระพันธ์ อนุวัตร แจ้งชัด กมลวรรณ แจ้งชัด และพิสิฏฐ์ ธรรมวิถี

3. อก.3/P14 อิทธิพลของบรรจุภัณฑ์ติดซัสเซพเตอร์ต่อคุณภาพของพายชั้นในตู้อบไมโครเวฟ..... 619
Effect of Susceptor Combined Packaging on the Quality of Puff Pastry in the Microwave Oven
โดย กนกศักดิ์ ลอยเลิศ ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์ และงามทิพย์ ภู่วโรดม

4. อก.4/P182 Effect of 4-hexylresocinol and Ascorbic Acid on Enzymatic Browning Reduction and Vitamin C Content of Fresh-cut Green Apple..... 629
By Siya Hun Nutthachai Pongprasert Pongphen Jitareerat Panida Boonyarithongchai and Varit Srilaong

5. อก.5/P16 การพัฒนาชาลำไยผสมสมุนไพรรวม 9 ชนิดแบบซองชง..... 637
Development of Longan Tea Bag Mixed with 9 Herbs
โดย พรรณนิภา ศิริพันธ์ อนุวัตร แจ้งชัด และกมลวรรณ แจ้งชัด

6. อก.6/P17 ลักษณะทางประสาทสัมผัส ความชอบและอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น.....645
Sensory Characteristics, Consumer Liking and Emotions of Virgin Coconut Oil Products
โดย นำสุข ศรีเจริญ ธงชัย สุวรรณสิชณน์
และสุนทรี สุวรรณสิชณน์
7. อก.7/P18 ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส และอิทธิพลของเพศและอายุต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคา..... 654
Factor Affecting Buying Decision and Influences of Gender and Age on Packaging Types and Price of Salad Dressing
โดย นำสุข ศรีเจริญ ธงชัย สุวรรณสิชณน์
และสุนทรี สุวรรณสิชณน์
8. อก.8/P26 ผลของสภาวะการสกัดต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารสกัดน้ำสาหร่ายเตา.....663
Effect of the Extraction Conditions on Antioxidant Activity and Total Phenolic Contents of Spirogyra spp. Liquid Extract
โดย พรภัสสร ภัทรศุภา หทัยรัตน์ ริมคีรี และพิสิฏฐ์ ธรรมวิถี
9. อก.10/P33 การทำนายคุณภาพภายในของมะม่วงเขียวเสวยด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟาเรดแบบพกพา.....671
Prediction of Internal Quality Parameters of Mango (*Mangifera indica* L. var. Khiew Sawoey) Using Portable near Infrared Spectrometer
โดย ดวงกมล ด่านขับต้อน ธงชัย สุวรรณสิชณน์
ศุมาพร เกษมสำราญ และสุรศักดิ์ เชียงกา
10. อก.11/P35 Formulation of Bael Tea with Aloe Vera and Its Physiochemical Changes after Thermal Processing 680
By Atittaya Tandhanskul and
Clara Stella Renata Widianarko
11. อก.13/P183 Effect of Strength Additive Modified Starches on Electrokinetic, Retention and Drainage of Linerboard Pulp Suspension.....688
By Sarochinee Wihakarat Somwang Khantayanuwong
and Phichit Somboon

12. อก.15/P56 สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกของกระชายเหลืองด้วยเอนไซม์เพกติเนส.....696
Optimal Condition for Phenolic Extraction from Fingerroot (*Boesenbergia pandurata*) Using Pectinase Enzyme
โดย ชัญญา บางโชคดี สุคันธรส ธาดากิตติสาร และหทัยรัตน์ ริมคีรี
13. อก.16/P57 สมบัติและฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งของสารสกัดโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105.....704
Characterization and Anti-Cancer Cells Activities of Albumin Protein Extract from Khao Dawk Mali 105 Rice Bran
โดย ธัญลักษณ์ สีลาจันทร์ สุคันธรส ธาดากิตติสาร และหทัยรัตน์ ริมคีรี
14. อก.17/P59 การพัฒนาผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์.....713
Development of Nano Serum Containing Nanocapsule of Organic Coffee Oil
โดย พัลลภา วุฒิภาพรกุล อมร ไชยสัตย์ ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์ ภารดี อสุโกวิท และสุพนิดา วินิจฉัย
15. อก.18/P60 ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปังสูตรน้ำมันรำข้าว..... 721
Effect of Emulsifiers on the Quality of Bread by Using Rice Bran Oil
โดย ปนิตา เล็กรุ่งเรืองกิจ และเอกพันธ์ แก้วมณีชัย
16. อก.19/P63 การหมักปลาร้าที่มีส่วนผสมของแป้งแก่นตะวันด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์.....729
Indigenous Fish Fermentation (Pla-ra) with Pure Lactic Acid Bacterial Culture Fortifying Jerusalem Artichoke Tuber Flour
โดย ณัฐสิทธิ์ ฉันทจิตปรีชา พฤทธิ์ ศรีรัตนจำรัส ภัทราภรณ์ เนตรทอง ศุภกิตติ์ เศวตภานุ ชื่นนภา ชูศรี ชนิกา ชื่นแสงจันทร์ ศิวพร วรรณวิไล และสาโรจน์ ศิริศันสนียกุล

17. อก.20/P64 ผลของ pH ในกระบวนการทำให้ใสและการเคี่ยวต่อลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไซรัปน้ำตาลมะพร้าว.....738
Effect of pH in Clarification and Evaporation Processes on Quality Attributes of Coconut Sugar Syrup
โดย ธนัชพร ใจตาบ และเอกพันธ์ แก้วมณีชัย
18. อก.22/P65 สมบัติบางประการของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้าที่ได้รับความนิยมในประเทศไทย..... 746
Some Properties of Popular Commercial Instant Noodle in Thailand
โดย สุพรัตน์ สุธีเวช ปิยะฉัตร ใจเอื้อ และดวงใจ ถิรธรรมถาวร
19. อก.24/P90 Anti-inflammatory Activity of Rice Phytosterols and γ-oryzanol in THP-1 Macrophages..... 754
By Mai Shibata and Wasaporn Chanput
20. อก.25/P92 ผลของสภาวะในการลวกต่อการสูญเสียปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและสีของกระเจี๊ยบเขียว..... 763
Effect of Blanching Conditions on Antioxidant and Color Loss of Okra (*Hibicusesculentus L.*)
โดย นิรมล อุตมอ่าง ศรัญญา เรืองสว่าง
และปาริชาต เคร่งครัด
21. อก.26/P101 การพัฒนาคำศัพท์ของใบมะกรูดสดและผ่านการทำแห้ง..... 773
Establishment of Vocabulary on Fresh and Dried Kaffir Lime Leaves
โดย ณัฐวดี มาลา และสุจินดา ศรีวัฒนะ
22. อก.29/P121 ผลของการสกัดด้วยเอนไซม์ต่อคุณภาพของโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าว.. 781
Effect of Enzymatic Extraction on Quality of Rice Bran Protein Hydrolysate
โดย ณัฏฐกานต์ จันทะวัง กมลวรรณ แจ้งชัด
ลัดดา แสงเดือน วัฒนศิริธรรม และอนุวัตร แจ้งชัด
23. อก.30/P123 การพัฒนากระดาษกรองน้ำมันพืชจากฟางข้าว..... 791
Development of Vegetable Oil Filtering Paper from Rice Straw
โดย วุฒินันท์ คงทัด สุธีรา วิทยากาญจน์ ชัยพร สามพุ่มพวง
จิรชยา บุญญฤทธิ์ และรังสิมา ชลคุป

24. อก.31/P124 Preparation and Purification of Oligosaccharides from Commercially Defatted Rice Bran 801
By Kamollak Jirakulkanok Ladda Sangduean Wattanasiritham and Pinthip Rumpagaporn
25. อก.32/P126 การพัฒนาแผ่นดูดซับต้านจุลินทรีย์สำหรับการบรรจุเนื้อไก่สด.....810
Development of Antimicrobial Absorbent Pad for Fresh Chicken Packaging
โดย อนุชา แสนทวีสุข และอำพร เสน่ห์
26. อก.33/P128 ผลของแป้งเผือกและแป้งข้าวเหนียวต่อคุณภาพเผือกเคี้ยวหนึบ..... 818
Effect of Taro Flour and Sticky Rice Flour on the Quality of Chewing Taro
โดย วันสิริ พุกเฉื่อย และกมลวรรณ แจ้งชัด
27. อก.34/P129 แนวทางการพัฒนาชุดบอดี้สูทตามความต้องการผู้ป่วยเด็กโรคสมองพิการ.. 828
Guidelines for The Development of Bodysuits for Children with Cerebral Palsy
โดย ชลกร แผลงมน พิมพวรรณ คุ้มภัย และปวริน ตันตริยานนท์
28. อก.35/P130 ผลของโปรตีนไอโซเลตจากถั่วและไข่ขาวผงต่อสมบัติของเส้นบะหมี่จากแป้งข้าว.....837
Effect of Pea Protein Isolate and Egg White Powder on the Properties of Alkaline Rice Noodles
โดย ศรสวรรค์ ชมเชย และมาศอุบล ทองงาม
29. อก.36/P131 ผลของระดับการขัดสีต่อสารให้กลิ่นในข้าวหุงสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105.....845
Effect of Degrees of Milling on Aroma Compounds in Cooked Rice (Khao Dawk Mali 105)
โดย อิสราภรณ์ จินะโกฏิ และวรรณี จิรภาคย์กุล
30. อก.37/P132 การปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยการใช้สตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรแอซีเทต..... 853
Improvement of Thermoplastic Starch Films Blowing Ability Using Cassava Starch Acetate
โดย ชาลิสา อินทะรังสี และน้ำฝน ลำดับวงศ์

31. อก.38/P133 ผลของมอลติทอลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของแยมเสาวรสพลังงานต่ำ.....864
Effect of Maltitol on Physical and Chemical Properties of Low Calorie Passion Fruit Jam
โดย ธิดารัตน์ หน่อสุวรรณ และเสาวณีย์ ตันเตชัย
32. อก.39/P134 Arabinoxylans Preparation from Commercially Defatted Rice Bran with Two Different Extraction Methods 871
By Passara Nakpong Ladda Sangduean Wattanasiritham and Pinthip Rumpagaporn
33. อก.40/P156 การเปรียบเทียบผลการย้อมผ้าฝ้ายด้วยครามและห้อม..... 880
Comparison of Dyeing Result on Cotton Fabric between *Indigofera Tinctoria Linn* and *Baphicacanthus Cusia Brem*
โดย เกศศินี นามกร และขนิษฐา วัชราภรณ์

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Subject:Natural Resources and Environment)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. ทส.4/O59 Enhanced Cellulolytic Enzyme System of the Multienzyme Complex from *Cellulosibacter alkalithermophilus* by Combination with Cellobiohydrolase and β-Glucosidase..... 889
By Sirilak Baramee and Khanok Ratanakhanokchai
2. ทส.11/O62 การจำแนกความขัดแย้งทางนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ..... 897
Classification of Recreation Conflicts in National Park Areas
โดย ศุภกร ประทุมถิ่น และนภวรรณ ฐานะกาญจน์ พงษ์เขียว
3. ทส.17/O243 การประเมินศักยภาพของชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันในพื้นที่จังหวัดพะเยา..... 905
Assessment of Community Potentiality in Reducing Smog Problem in Phayao Province
โดย สุชัญญา ทองเครือ สิทธิชัย มุ่งดี และบุหรัน พันธุ์สวรรค์

4. ทส.18/O244 การเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสละลายน้ำในอ่าวไทยตอนใน..... 913
Variation of Dissolved Phosphorus and Form in the Inner Gulf of Thailand
โดย ณัชชา สุพวานิช และมารุต สุขสมจิตร
5. ทส.21/O166 ผลของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อความร้อนในเมืองเวียงจันทร์ ณ ประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว..... 921
Effect of Land Use Change on Urban Heat at Vientiane Capital, Lao PDR
โดย อนุรักษ์ ราชวงศ์ และสุรัตน์ บัวเลิศ
6. ทส.24/O245 การบำบัดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจากสายธารอากาศโดยระบบถังกรองชีวภาพ แบบตัวกลางแผ่นใยขัด..... 929
Treatment of Volatile Organic Acids from Air Stream via Scouring Pad-Biofiltration System
โดย ปิยาภรณ์ สมสมัคร ปานยจิตต์ พลับใจบุญ
ธราธร คูหา และประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. ทส.1/P1 การจัดการขยะอินทรีย์ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี939
Organic Wastes Management of Pattawee Municipality Makham District Chanthaburi Province
โดย เกียรติภูมิ จันเต และสุนทรี จีนธรรม
2. ทส.6/P42 การคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ลิกนิโนไลติกจากตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษ..... 950
Isolation of Ligninolytic Enzyme Producing Bacteria from Sludge and Paper Mill Wastewater
โดย พรรณี มณีชัย และสุชัญญา ทองเครือ

3. ทส.8/P43 องค์ประกอบชนิดอาหารในกระเพาะอาหารของปูก้ามดาบ *Uca forcipata* ในป่าชายเลนบริเวณคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม…….. 958
Diet Compositions of Fiddler Crab, *Uca forcipata* in Mangrove at Klong Kone and Laem Yai, Samut Songkhram Province
โดย ธีรดา น้อยถนอม วัลฤล จงธนกานต์ และศิรประภา เปรมเจริญ

4. ทส.10/P45 ปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากการชะละลายของใบไม้จากต้นแสมขาว…… 968
Abundance and Form of Phosphorus Leaching from *Avicennia alba* Leaves
โดย กุลกานต์ ช่วยบำรุง และมารุต สุขสมจิตร

5. ทส.12/P47 ความสัมพันธ์ของหอยกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน บริเวณป่าชายเลนปากแม่น้ำ ตำบลคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม……..976
Molluscs in Relation to Soil Organic Matter Content in Mangrove Estuary at Klong Kone and Laem Yai Sub-District, Samut Songkhram Province
โดย สรนันท์ วิธิรวาท และศิรประภา เปรมเจริญ

6. ทส.14/P48 การคัดแยกและระบุสายพันธุ์แบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสจากน้ำเสียการผลิตปลาส้ม…… 983
Screening and Identification of Lipase Producing Bacteria From Fermentation Fish Production Wastewater
โดย สิรินาถ ปลอดสุวรรณ สุชัญญา ทองเครือ และชญาน์นันท์ จิตมณี

7. ทส.20/P103 การใช้ประโยชน์และการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลน กรณีศึกษา บ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา……..991
The Utilization and Participation of the Public in the Conservation and Restoration of Mangrove Forests in Ban Klang, Bangtoey Subdistrict, Muang District, Phang-nga Province
โดย ธิดารัตน์ คำล้อม นิติญา สังขนันท์ และนงนภัส สกุลมา

8. ทส.22/P139 Kinetics Investigation of Cr(VI) Removal by Nanocomposite Adsorbent..... 999
By Sureerat Thomyasirigul Pattapol Lertsuriyakul Tappitak Wangpang and Udomsak Boonmeerati
9. ทส.23/P140 การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร..... 1007
Assessment of Greenhouse Gas Emission from Bangkok Metropolitan Administration's Wastewater Treatment Plants
โดย ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และญาณิศา ส่องประทีป
10. ทส.26/P148 การบำบัดน้ำมันและไขมันในน้ำเสียจากร้านสะดวกซื้อด้วยถังดักไขมันเสริมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ..... 1015
Removal of Oil and Grease from Convenience Store Wastewater Using Grease Trap with Natural Sorbents
โดย รตีวรรณ สุวัฒนมาลา กาญจนาภรณ์ อัครวงษ์ ช่อสุดา สูงทรัพย์ไพศาล ฐิติกานต์ บุญต่อ และเอมอร ประจวบมอญ

สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม

Subject: Science and Genetic Engineering

ภาคบรรยาย

Oral Presentation

ปริมาณฟีนอลิกรวม ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของส่วนสกัดจากโสน

Total Phenolic, Antioxidant, and Antibacterial Activities of *Sesbania javanica* Miq. Extract

ปิยะดา พันธุ์สระน้อย[1] ชัชวิน เพชรเลิศ[2] และวิสาตรี คงเจริญสุนทร[1*]

Piyada Pansanoi[1], Chatchawin Petchlert[2] and Wisatre Kongchareonsuntorn[1*]

บทคัดย่อ

โสน *Sesbania javanica* Miq. อุดมไปด้วยสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในกลุ่มฟลาโวนที่มีหมู่เมทิลไดไฮโดรฟลาโวนอยด์, ฟลาโวนอลโอ-กลัยโคไซด์ และฟลาวาโนนโอ-กลัยโคไซด์ มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ และยับยั้งเชื้อแบคทีเรียฉวยโอกาส ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของส่วนสกัดจากโสน ด้วยวิธี DPPH และวิธี FRAP assay หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ และศึกษาฤทธิ์ต้านการเจริญของเชื้อแบคทีเรียฉวยโอกาส 4 สายพันธุ์ ผลการวิจัยพบว่า ส่วนสกัดจากใบและดอกโสนมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมไม่แตกต่างกัน อีกทั้งยังมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (EC_{50} = 1.70 และ 2.20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ) และมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียฉวยโอกาส *Bacillus subtilis* ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* และ *Pseudomonas aeruginosa* ตามลำดับ (ให้ค่า MIC อยู่ระหว่าง 20-80 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) และมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียทั้งสี่สายพันธุ์ไม่แตกต่างกัน

ABSTRACT

Sesbania javanica Miq. contained phenolic and flavonoid compounds: flavonoid, methyl dihydroflavonoid, flavonol o-glycosides and flavonone o-glycosides. Biological properties of *S. javanica* Miq. have been proposed as antioxidant activity and antibacterial activity. The objective of this study was to investigate the antioxidant and antibacterial activity. The antioxidant activity was assayed by scavenging effect on DPPH (2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical examination and the test of reduction of iron (FRAP). Also, the total phenolic, flavonoid compounds as well as antibacterial activity against four opportunistic bacteria were determined. The results revealed that leave and flower extracts exhibited the total phenolic DPPH radical scavenging activity (EC50= 1.70 and 2.20 mg/ml extract, respectively). *S. javanica* Miq.'s extract has the best antibacterial activity against *Bacillus subtilis,* as followed by antibacterial activities against *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*, respectively (as MICs were between 20-80 mg/ml). However, all antibacterial activities of four bacteria were not significant different (p =0.05).

Key Words: *Sesbania javanica* Miq. Extract, Phenolic, Flavonoid, Antioxidant, Antibacterial activity, opportunistic bacteria

* Corresponding author; e-mail address: **wisatre@buu.ac.th**

[1]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาจ.ชลบุรี20130

[1]Biology Department, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi20130

[2]ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาจ.ชลบุรี20130

[2]Biochemistry Department, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi20130

บทนำ

ผักพื้นบ้านในประเทศไทย Genus *Sesbania* ได้แก่โสนคางคก (*Sesbania bispinosa*) แคบ้าน (*Sesbania candiflora*) สมี (*Sesbania sesban*) โสนอินเดีย (*Sesbania speciosa*) และโสนกินดอก (*Sesbania javanica*) สำหรับดอกโสนที่ใช้รับประทานเป็นอาหารในประทศไทยคือ โสนหินหรือโสนกินดอก เป็นไม้ล้มลุก มีลักษณะเป็นพุ่ม อายุปีเดียว ขึ้นตามหนองน้ำ ออกดอกในช่วงปลายฤดูฝนประมาณเดือนกันยายน-ตุลาคม (ส่วนพฤกษศาสตร์ป่าไม้, 2557) โสนหาได้ง่าย ราคาถูก มีคุณค่าทางโภชนาการ และเป็นที่นิยมรับประทาน มีฤทธิ์ต้านการก่อกลายพันธุ์ของเซลล์ที่อาจพัฒนาไปเป็นเซลล์มะเร็ง ป้องกันโรคหลอดเลือดและหัวใจขาดเลือด ผนังหลอดเลือดแข็งตัว (atherosclerosis) โรคเสื่อมของระบบต่าง ๆ ในร่างกาย (Rattanasena, 2012) ฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญของโสนและพืชใน Genus *Sesbania* ได้แก่ ฤทธิ์ต้านการก่อกลายพันธุ์ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Lee *et al.,* 2014; Tangvarasittichai *et al*., 2005) สารสำคัญที่พบได้แก่ genistein, prunetin, 4-hydroxycinnamic acid และ quercetin 3-2 (G) –rhamnosyl-rutinoside สารดังกล่าวเป็นสารฟลาโวนอยด์และที่สำคัญมีฤทธิ์ต้านการก่อกลายพันธุ์ (Laladhas *et al*., 2010)

แบคทีเรียแกรมลบฉวยโอกาสจัดเป็นเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคที่สำคัญในมนุษย์ บางชนิดไม่พบในผู้ที่มีสุขภาพแข็งแรงทั่วไป แต่มักก่อให้เกิดโรคติดเชื้อฉวยโอกาสในผู้ที่มีระบบภูมิคุ้มกันบกพร่อง และเป็นสาเหตุสำคัญของการติดเชื้อในโรงพยาบาล (hospital – acquired infection หรือ nosocomial infection) เช่น เชื้อ *Pseudomonas aeruginosa* ที่มักก่อให้เกิดการติดเชื้อจากแผลผ่าตัดในผู้ป่วยที่พักรักษาตัวในโรงพยาบาล เชื้อ *Escherichia coli* ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ (food poisoning) *Staphylococcus aureus* ก่อโรคติดเชื้อบนผิวหนังโดยเฉพาะโรคฝีหนอง *Bacillus subtilis* เป็นเชื้อฉวยโอกาสในผู้ที่เสพยาเสพติดทางเส้นเลือด และผู้ป่วยโรคมะเร็ง สามารถพบก่อโรคได้หลายระบบ เช่น โรคปอดบวมชนิดรุนแรง การติดเชื้อในกระแสเลือด โรคลิ้นหัวใจอักเสบ การติดเชื้อของบาดแผลผ่าตัด และโรคท้องร่วง (Dhama *et al.,* 2014) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเชื้อแบคทีเรียฉวยโอกาสเหล่านี้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของยาที่ใช้รักษาลดน้อยลง หรืออาจไม่สามารถรักษาชีวิตผู้ป่วยได้ จากปัญหาเหล่านี้จึงจำเป็นต้องพัฒนายาชนิดใหม่ หรือหาทางเลือกใหม่เพื่อรักษาโรคติดเชื้อฉวยโอกาส เช่น การนำยาปฏิชีวนะที่ใช้ไม่ได้ผลมาใช้ร่วมกับพืชสมุนไพร หรือหาสารบริสุทธิ์ที่สกัดจากธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยลดอุบัติการณ์การดื้อยา และไม่มีผลข้างเคียงกับผู้ใช้ยา (Dhama *et al.,* 2014)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโสนมีสารกลุ่ม flavonoids และ phenolic acid ปริมาณมาก ในใบและดอกโสนประกอบด้วยสารบริสุทธิ์ 5 ชนิด ได้แก่ β-sitosterol, prunetin, genistein, 4-hydroxycinnamic acid และ sitosterol-3-*O*-ß-D-glucopyranoside (Tangvarasittichai *et al*., 2005) สารกลุ่ม flavonoids และ phenolic acid ในโสนอาจจะช่วยรักษาสมดุลเมตาบอลิซึมของเซลล์ เพราะเมื่อเซลล์ติดเชื้อจะทำให้เกิดการอักเสบ เนื่องจากอนุมูลอิสระปริมาณมากจะไปทำลายสารชีวโมเลกุล จึงไปเพิ่มปริมาณสารอนุมูลอิสระในร่างกายให้เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เซลล์เม็ดเลือดขาวในระบบภูมิคุ้มกันอ่อนแอทำให้ร่างกายติดเชื้อโรคจากแบคทีเรียฉวยโอกาสได้ง่ายยิ่งขึ้น (Dhama *et al*., 2014) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาโสน เพราะเป็นผักพื้นบ้านที่ใช้รับประทานกันอย่างแพร่หลาย อุดมไปด้วยสารกลุ่ม phenolic acid และ flavonoids มากมาย ซึ่งอาจมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย และต้านอนุมูลอิสระ ส่งผลในการลดการอักเสบของเนื้อเยื่อในร่างกายเมื่อติดเชื้อเชื้อแบคทีเรียฉวยโอกาส

งานวิจัยนี้จึงต้องการพิสูจน์ให้เห็นว่าโสนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านแบคทีเรียฉวยโอกาส รวมทั้งหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในโสน เพื่อใช้เป็นข้อมูลทางวิทยาศาสตร์สำหรับการเลือกบริโภคอาหารที่มีประโยชน์แก่ร่างกาย ช่วยส่งเสริมโสนให้มีความสำคัญทางเศรษฐกิจเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาต่อในด้านต่าง ๆ ได้ เช่นเป็นทางเลือกของการนำโสนไปใช้ทดแทนยาปฏิชีวนะ ใช้เป็นอาหารเสริม รักษาสุขภาพ และป้องกันโรคติดเชื้อจากแบคทีเรียฉวยโอกาส

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บตัวอย่างโสน

เก็บส่วนลำต้น ใบและดอกโสน รหัสพรรณไม้อ้างอิงคือ ScBuu-Ny601 (ส่วนพฤกษศาสตร์ป่าไม้, 2557) และได้รับการยืนยันสายพันธุ์ โดย ดร. เบญจวรรณ ชีวปรีชา (นักพฤษศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี) ในช่วงเดือนมิถุนายน – ตุลาคม 2558 จากบริเวณตำบลพระอาจารย์ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก นำมาทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทิ้งให้แห้งในอุณหภูมิห้อง บดเป็นผงละเอียด เก็บไว้ไม่ให้สัมผัสอากาศและแสง

การสกัดสาร

นำใบและดอกโสนที่บดเป็นผงละเอียด มาสกัดด้วยตัวทำละลาย เมทานอล: น้ำ (อัตราส่วน 80: 20) ในอัตราส่วน 1: 5 สกัดโดยการแช่ กวนหรือคนให้เข้ากัน แล้วปิดภาชนะทิ้งไว้ 6-7 วันที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายทั้งหมดไปกรองแยกเปลือกทิ้งด้วยผ้าขาวบาง แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 นำสารที่สกัดได้มาระเหยตัวทำละลายออกโดยใช้เครื่องระเหยสุญญากาศ แล้วนำมาทำให้แห้งอีกครั้งด้วยเครื่องระเหยแห้งแบบเยือกแข็ง จะได้สารสกัดหยาบ ชั่งน้ำหนักของสารที่สกัดได้ คำนวณผลผลิตร้อยละ (% yield)

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม

วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวมโดยใช้ส่วนสกัดจากโสนความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร วิเคราะห์ตามวิธีของ Misbah, Abdul and Aminudin (2013) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร แสดงค่าในหน่วยมิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อกรัมของส่วนสกัด

การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์รวม

วิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์รวมโดยใช้ส่วนสกัดจากโสนความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร วิเคราะห์ตามวิธีของ Srisawat *et al.* (2010) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร แสดงค่าในหน่วยมิลลิกรัมของเควอร์เซทินต่อกรัมของส่วนสกัด

การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยใช้ส่วนสกัดจากโสนความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกำจัดอนุมูล $DPPH^{\cdot}$ หรือ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical (Mokbel and Hashinaga, 2005) คำนวณเป็นค่า EC_{50} และวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay (ไชดานี บือราเฮง และชัชวิน เพชรเลิศ, 2558) แสดงค่าในหน่วยมิลลิกรัมของเฟอร์รัสซัลเฟตต่อกรัมของส่วนสกัด

การศึกษาฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยวิธี Agar well diffusion method และการหาค่า Minimal Inhibition Concentration (MIC)

ศึกษาฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *E. coli* และ *B. subtilis* โดยปรับค่าความขุ่นของแบคทีเรียให้มีค่าเท่ากับค่ามาตรฐาน McFarland 0.5 เพาะเลี้ยงในอาหาร Mueller-Hinton Agar หาค่า MIC เทียบกับยาปฏิชีวนะแอมพิซิลลินและเตเตราซัยคลิน (Clinical and standard Institute, 2006)

การตรวจวัดเชิงคุณภาพของสารโพลีฟีนอลชนิดต่าง ๆ โดยวิธีโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง (Thin layer chromatography, TLC)

นำส่วนสกัดจากโสนความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แต้ม (spotting) ลงบนแผ่น TLC ซึ่งมีตัวทำละลายอยู่ (Table1) ตรวจสอบผลโดยการมองด้วยตาเปล่า และส่องด้วย UV ที่ความยาวคลื่น 256 นาโนเมตร

Table1 Proportion of solvent

group of flavonoid	solvent	proportion
flavonoid	chloroform: ethyl acetate	3:2
methyl dihydro flavonoid	chloroform: methanol	3:1
flavonol o-glycosides	chloroform:ethyl acetate: acetone	5:1:4
flavonone o-glycosides	chloroform: acetic acid	100:4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของส่วนสกัดจากใบและดอกโสน

ส่วนสกัดจากใบและดอกโสนมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมไม่แตกต่างกัน (Figure 1) แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของฟีนอลในใบและดอกโสนมีปริมาณสัดส่วนที่เท่ากัน (ส่วนสกัดจากใบและดอกโสนมีปริมาณฟีนอลิกรวมเท่ากับ 35.93 ±0.0004 และ 34.81 ±0.0008 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลิกต่อกรัมของส่วนสกัดตามลำดับ) และน่าจะเป็นสารกลุ่ม flavonol glycoside เช่นเดียวกับรายงานของอุทัยวรรณ เลิศศักดิ์ศรีสกุล (2550) และ Tangvarasittichai *et al.* (2005) ที่ศึกษาสารบริสุทธิ์ในใบและดอกโสน ด้วยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (spectroscopy และ HPLC) และวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่า ใบและดอกโสนประกอบด้วยสารบริสุทธิ์ ได้แก่ β-sitosterol, prunetin, genistein, 4-hydroxycinnamic acid, sitosterol-3-*O*--D-glucopyranoside, flavonol glycoside และ Quercetin 3-2(G) rhamnosylrutinoside มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ผลการตรวจวัดเชิงคุณภาพของสารโพลีฟีนอลชนิดต่าง ๆ ของส่วนสกัดจากใบและดอกโสน

จากการตรวจวัดเชิงคุณภาพของสารโพลีฟีนอลชนิดต่าง ๆ ของส่วนสกัดจากใบและดอกโสนโดยวิธีโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง (TLC) พบว่า ส่วนสกัดจากใบและดอกโสนมีสารในกลุ่มกลุ่มฟลาโวนอยด์, ฟลาโวนที่มีหมู่เมทิลไดไฮโดรฟลาโวนอยด์, ฟลาโวนอล โอ-กลัยโคไซด์ และฟลาวาโนน โอ-กลัยโคไซด์ การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์รวมของส่วนสกัดจากใบและดอกโสน พบว่าส่วนสกัดจากใบและดอกโสนมีปริมาณฟลาโวนอยด์รวม เท่ากับ 72.34±0.002 และ 71.71±0.004 มิลลิกรัมสมมูลของเควอร์เซตินต่อสามกรัมของส่วนสกัด ตามลำดับ (Figure 1) อธิบายได้ว่า ส่วนสกัดจากใบและดอกโสนมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมไม่

แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของสารโพลีฟีนอลในใบและดอกโสน มีปริมาณสัดส่วนที่เท่ากันและน่าจะเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอล กลัยโคไซด์ เช่นเดียวกับรายงานวิจัยของอุทัยวรรณ เลิศศักดิ์ศรีสกุล (2550) และ Tangvarasittichai *et al.* (2005) ที่พบสารโพลีฟีนอล ได้แก่ prunetin, genistein, 4-hydroxycinnamic acid Quercetin 3-2(G)-rhamnosylrutinoside

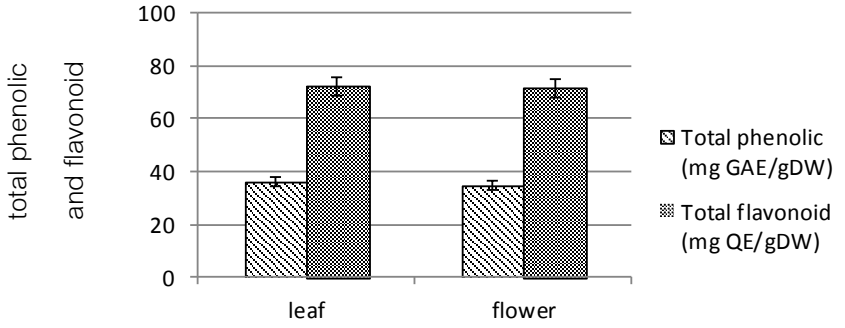


Figure 1 Total phenolic and flavonoid of leaf and flower extract of *S. javanica* Miq.

ผลการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของส่วนสกัดจากโสนใช้เทคนิคการกำจัดอนุมูลอนุมูล DPPH$^{\bullet}$

การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของส่วนสกัดจากโสนใช้เทคนิคการกำจัดอนุมูล DPPH$^{\bullet}$ พบว่าทั้งสองส่วนของโสนสามารถต้านอนุมูลอิสระ และส่วนสกัดจากดอกโสนและใบโสนมีฤทธิ์ในการกำจัดอนุมูล DPPH$^{\bullet}$ ไม่แตกต่างกัน (0.312 ถึง 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) พบว่าฤทธิ์กำจัดอนุมูล DPPH$^{\bullet}$ เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของส่วนสกัด (EC_{50} = 1.70 mg/ml และ 2.20 mg/ml ตามลำดับ) ซึ่งมีปริมาณที่มากกว่าส่วนสกัดจากใบแค เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Ouattara *et al.* (2011) และ Doddola *et al.* (2008) ซึ่งทดสอบด้วยวิธีเดียวกัน โดยพบว่า ส่วนสกัดจากใบแค มีฤทธิ์ในการกำจัดอนุมูล DPPH$^{\bullet}$ ที่ดี (EC_{50} = 24 µg/mL) นอกจากนี้งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการต้านอนุมูลอิสระของพืชวงศ์เดียวกันคือแค และโสน มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระที่ต่างกัน อันเนื่องมาจากพืชแต่ละชนิดมีสารสำคัญในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ สภาพแวดล้อมในการปลูกอายุและช่วงเวลาที่เก็บเกี่ยว จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่ควรนำไปศึกษาหาวิธีการสกัดที่เหมาะสมสำหรับพืชแต่ละชนิดต่อไป ซึ่ง Boutakiout *et al.* (2016) ได้ศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกของกระบองเพชรกินได้ (prickly pear) จากฤดูกาลเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน พบว่า ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ จะมีความแตกต่างกันในทุกฤดู โดยพบสูงสุดในฤดูร้อน

ผลการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของส่วนสกัดจากโสนด้วยวิธี FRAP assay

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP assay พบว่าส่วนสกัดจากใบและดอกโสนสามารถรีดิวซ์ไอออนโลหะได้ไม่แตกต่างกัน (Figure 2) คือเท่ากับ 46.89±0.003 และ 45.90±0.003 มิลลิกรัมสมมูลของเฟอร์รัสซัลเฟตต่อกรัมของส่วนสกัด ตามลำดับ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดีนั้นเป็นผลมาจากสารกลุ่ม tannins, flavonoids, coumarins, steroids, triterpenes ที่มักพบในทุกส่วนของต้นแคและพืชวงศ์โสนเช่นเดียวกับ Ouattara *et al.* (2011) และ Lee *et al.* (2014) แต่โสนให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากกว่าแค เมื่อทดสอบด้วยวิธีเดียวกันโดยพบว่า ส่วนสกัดจากใบแค สามารถรีดิวซ์ไอออนโลหะได้เท่ากับ 0.75 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแอสคอร์บิกต่อกรัมของส่วนสกัด

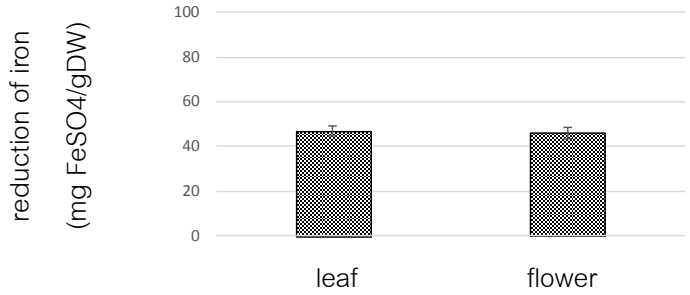


Figure 2 Reduction of iron of leaf and flower extract of *S. javanica* Miq.

ผลการศึกษาฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยวิธี Agar well diffusion method

จากการศึกษาฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยวิธี Agar well diffusion method และการหาค่า MIC ของส่วนสกัดจากโสน (Table 2) พบว่าส่วนสกัดจากใบและดอกโสน มีผลในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 4 สายพันธุ์ไม่แตกต่างกัน ส่วนสกัดจากใบและดอกโสนซึ่งพบว่าสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ *E. coli* ได้ดีที่สุด และยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าแกรมลบ และในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่ายาเตเตราซัยคลินมีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียทั้ง 4 สายพันธุ์ได้ดีกว่าใบและดอกโสนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งรายงานวิจัยนี้ตรงกับการทดสอบส่วนสกัดจากโสนและแค ให้ผลยับยั้งเชื้อตรงกัน คือ *P. aeruginosa*, *E. coli* และ *S. aureus* ไม่แตกต่างกัน (Wagh, Wagh, Toshniwal and Sonawane, 2012) กลไกการออกฤทธิ์ของโสน อาจไปทำลายผนังเซลล์ หรือการยับยั้งการสร้างผนังเซลล์ รบกวนการทำงานของเยื่อหุ้มเซลล์ในการขนส่งสารเข้าออกเซลล์ ยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีน และยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ต่าง ๆ ที่จำเป็นในปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการเมแทบอลิซึมในเซลล์แบคทีเรีย (Shan, Cai, Brooks and Corke, 2007)

Table 2 Bacterial inhibiting activity

Gram	bacteria	MIC (mg/ml)			
		leaf	flower	tetracycline	ampicillin
Gram -	*P. aeruginosa*	80	80	0.040	1.25
	E. coli	40	40	0.010	0.010
Gram +	*S. aureus*	40	40	0.001	0.001
	B. subtilis	20	20	0.001	0.020

จะเห็นได้ว่า โสนเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการบริโภคอาหารที่มีประโยชน์แก่ร่างกายควรแก่การส่งเสริมให้มีความสำคัญทางเศรษฐกิจเพิ่มขึ้นอีกทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาต่อในด้านต่าง ๆ ได้ เช่น การใช้โสนทดแทนการใช้ยาปฏิชีวนะ หรือนำส่วนสกัดจากโสนสังเคราะห์เป็นโมเลกุลขนาดเล็กและเพิ่มประสิทธิภาพการออกฤทธิ์ร่วมกับตัวยาชนิดอื่น ๆ หรือใช้โสนสกัดเป็นอาหารเสริมเพิ่มฟลาโวนอยด์ เพื่อบำรุงสมอง ช่วยชะลอความแก่และความเสื่อมของดวงตา และต้านอนุมูลอิสระ ด้านสุขภาพ โดยการนำมาทำชาเพื่อสุขภาพ สามารถทำเองได้ง่ายไว้รับประทานได้ด้วยตัวเอง หรือจะพัฒนาโสนเป็นสินค้าประจำท้องถิ่นต่อไปได้ และด้านเครื่องสำอาง ใช้สาร

สกัดจากโสนเป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง เนื่องจากมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพเท่าเทียมสารเคมี เช่น ใช้สำหรับขัดผิว ใช้สำหรับทำความสะอาดผมและผิว เป็นต้น

สรุป

โสนอุดมไปด้วยสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในกลุ่มฟลาโวนที่มีหมู่เมทิลไดไฮโดรฟลาโวนอยด์, ฟลาโวนอลโอ-กลัยโคไซด์ และฟลาวาโนนโอ-กลัยโคไซด์ ซึ่งส่วนสกัดจากใบและดอกโสน มีฤทธิ์กำจัดอนุมูล $DPPH^{\cdot}$ และต้านอนุมลอิสระ ด้วยวิธี FRAP assay และยับยั้งเชื้อแบคทีเรียฉวยโอกาส 4 สายพันธุ์ ไม่แตกต่างกัน แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่ายาแอมพิซิลลินและเตเตราซัยคลิน

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยบูรพาและโรงพยาบาลชลบุรีที่เอื้อเฟื้อให้เชื้อจุลินทรีย์ในการทำการศึกษาทดลอง และขอบคุณภาควิชาชีววิทยา และภาควิชาชีวเคมี มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ในการทำทดลอง และ ดร.เบญจวรรณ ชีวปรีชา ที่ช่วยระบุสายพันธุ์โสน

เอกสารอ้างอิง

ไซดานี บือราเฮง และชัชวิน เพชรเลิศ. 2558. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเอทานอลจากยี่หร่าดำและยี่หร่าขาว, |BI-O-027 | น 1-6. ใน **รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ "วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 7"**. มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

ส่วนพฤกษศาสตร์ป่าไม้ กรมป่าไม้. 2557. **ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย เต็ม สมิตินันทน์**. ฉบับแก้ไขเพิ่มเติม พศ. 2557. โรงพิมพ์สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

อุทัยวรรณ เลิศศักดิ์ศรีสกุล. 2550. **การหาสูตรโครงสร้างและฤทธิ์ทางชีวภาพของสารจากดอกและใบโสน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

Boutakiout, A., Elothmani, D., Hanine, H., Mahrouz, M., Le Meurlay, D., Hmid, I. and Ennahli, S. 2016. Effects of different harvesting seasons on antioxidant activity and phenolic content of prickly pear cladode juice. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. In press.

CLSI (Clinical and Laboratory Standards Institute). 2006. **Performance standards for antimicrobial susceptibility testing**. National Committee for Clinical Laboratory standards, Wayne, PA.

Dhama, K., Tiwari, R., Chakraborty, S., Saminathan, M., Kumar, A., Karthik, K., Wani, M.Y., Amarpal, Singh, S.V. and Rahal, A. 2014. Evidence based antibacterial potentials of medicinal plants and herbs countering bacterial pathogens especially in the era of emerging resistance: an integrated update. **International Journal of Pharmacology** 10(1): 1-43.

Doddola, S., Pasupulati, H., Koganti, B. and Koganti, V.S.R.G. 2008. Evaluation of *Sesbania grandiflora* for antiurolithiatic and antioxidant properties. **Journal of Natural Medicines** 62(3): 300-307.

Laladhas, K.P., Cheriyan, V.T., Puliappadamba, V.T., Bava, S.V., Unnithan, R.G., Vijayammal, P.L. and Anto, R.J. 2010. A novel protein fraction from *Sesbania grandiflora* shows potential anticancer and chemo preventive efficacy, in vitro and in vivo. **Journal of Cellular and Molecular Medicine** 3(14): 636-646.

Lee, J.H., Cho, S., Paik, H.D., Choi, C.W., Nam, K.T., Hwang, S.G. and Kim, S.K. 2014. Investigation on antibacterial and antioxidant activities, phenolic and flavonoid contents of some thai edible plants as an alternative for antibiotics. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences** 27(10): 1461-1468.

Misbah, H., Abdul, A.A. and Aminudin, N. 2013. Antidiabetic and antioxidant properties of *Ficusdeltoidea* fruit extracts and fractions. **BMC Complementary and Alternative Medicine** 13(118): 1-12.

Mokbel, M.S. and Hashinaga, F. 2005. Antibacterial and antioxidant activities of banana (*Musa*, AAA cv. Cavandish) fruits peel. **American Journal of Biochemistry and Biotechnology** 3: 125-131.

Ouattara, M.B., Konaté, K., Kiendrébéogo, M., Ouattara, N., Compaore, M., Meda, R., Millogo-Rasolodimby, R. and Nacoulma, O.G. 2011. Antibacterial potential and antioxidant activity of polyphenols of *Sesbania grandiflora*. **Journal of Biological Sciences** 3(4): 351-356.

Rattanasena, P. 2012 .Antioxidant and antibacterial activities of vegetables and fruits commonly consumed in Thailand. **Pakistan Journal of Biological Sciences** 15(18): 77-82.

Shan, B., Cai, Y.Z., Brooks, J.D. and Corke, H. 2007. The in vitro antibacterial activity of dietary spice and medicinal herb extracts. **International Journal of Food Microbiology** 10: 112-119.

Srisawat, U., Panunto, W., Kaendee, N., Tanuchit, S., Itharat, A., Lerdvuthisopon, N. and Hansakul, P. 2010. Determination of Phenolic Compounds, Flavonoids, and Antioxidant Activities in Water Extracts of Thai Red and White Rice Cultivars. **Journal of the Medical Association of Thailand** 93(7): S83-S91.

Tangvarasittichai, S., Sriprang, N., Harnroongroj, T.andChangbumrung, S. 2005. Antimutagenic activity of *Sesbania javanica* Miq. flower DMSO extract and its major flavonoid glycoside. **The Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health** 36(6): 1543-1551.

Wagh, K.V., Wagh, V.D., Toshniwal, S.S., and Sonawane, B.R. (2012). Phytochemical, Antimicrobial evaluation and determination of total phenolic and flavonoid contents of *Sesbania grandiflora* flower extract. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences** 4(4): 229-232.

Evaluation of Radiological Hazard Impact in Ao Noina at Koh Samet in Rayong Province (Thailand) after the Oil Spill Disaster in Gulf of Thailand on 27 July, 2013

Prasong Kessaratikoon[1*], Nikom Choosiri[1], Ruthairat Boonkrongcheep[1] and Udorn Youngchauy[2]

ABSTRACT

The specific activities of natural (^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th) and anthropogenic (^{137}Cs) radionuclides and their frequency distributions in 24 surface beach sand samples collected from Ao Noina in Koh Samet in Rayong province (Thailand), have been measured, analyzed and studied after the oil spill disaster in Gulf of Thailand on 27 July, 2013. It was found that the frequency distribution of specific activities of ^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{137}Cs for the studied area were asymmetrical distribution with the skewness of -0.14, 1.45, 0.77 and 1.31, respectively. The median values of specific activities of ^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{137}Cs in Bq/kg were 1224.20 ± 96.27, 12.37 ± 1.84, 4.96 ± 0.71 and 0.27 ± 0.11 Bq/kg, respectively. Furthermore, four radiological hazard indices which are gamma absorbed dose rate (D), radium equivalent activity (Ra_{eq}), external hazard index (H_{ex}) and annual external effective dose rate (AED_{out}) for the investigated area were also evaluated by using the median values of specific activities of ^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th. The results were also compared with the Office of Atoms for Peace (OAP) annual report data, Thailand and global radioactivity measurement and evaluations. Moreover, the radioactive contour maps of the investigated area were also constructed and shown in this paper.

Key words: specific activity, surface beach sand, oil spill, radionuclide, radiological hazard index

*Corresponding author; e-mail address **prasong_mi@hotmail.com**

[1]Nuclear and Material Physics Research Unit (NuMPRU) Department of Basic Science and Mathematics, Faculty of Science, Thaksin University, Songkhla Campus, Songkhla, 90000, Thailand.

[2]Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization) (TINT), 9/9 Moo 7 Saimoon Sub-District, Ongkarak District, Nakhon Nayok, 26120, Thailand.

INTRODUCTION

According to its radionuclide content, specifically the presence of Uranium and Thorium series members, crude oil is both toxic due to its toxic chemical and radioactive contents. These radionuclides and members of their decay chains are found in the earth's crust and therefore become incorporated into the crude oil during the process of oil drilling and production (Chad-Umoren, 2012). Consequently, depending on the radioactive nature of the crude oil, spillage can lead to harmful elevation of the ionizing radiation profile of the environment. The deleterious radiological health hazard of radionuclide element posed by human activities, especially in the production of oil and gas and its allied applications have attracted great concern and tremendous interest over the years in the field of radiation protection studies (Arogunjo *et al*., 2004a). Furthermore, uncontrolled release of activities associated with enhanced levels of naturally occurring radioactive materials (NORM) can contaminate the environment and pose a risk to human health (IAEA, 2010).

On 27 July 2013, a pipeline owned by the Petroleum Authority of Thailand, Global Chemical Plc. (PTTGC) leaked crude oil into the Gulf of Thailand off the coast of Koh Samet, a favorite tourist island in Mueang Rayong District of the Rayong province. Tourists in the area were evacuated and emergency response teams entered the affected areas. Oil spills negatively impact the economy through the destruction of natural resources and livelihoods of the people in contaminated areas. After the oil spill, the tourism and fishing industries suffered due to consumers' concern over contaminated beaches and seafood (Cosarotto *et al*., 2014).

Since Ao Noina is one of the risky areas which might be effected by the oil spill disaster in Gulf of Thailand on 27 July 2013. This studied area locates in the North of the Koh Samet in Rayong province in the eastern region of Thailand. The objectives of this study were to measure the specific activities of natural (^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th) and anthropogenic (^{137}Cs) radionuclides in surface beach sand samples, to study and analyze the frequency distribution of all specific activities values and to assess the radiological hazard impact on the environment and population of the investigated area after the accident which may enhance content of naturally occurring radionuclides.

MATERIALS AND METHODS

1. Sample collection and preparation

Each of 24 surface beach sand samples was dried up at room temperature after collection and sieved through a 2 mm mesh-sized sieve to remove stone, grass and other macro-impurities. Then, all beach sand samples were oven dried at a temperature of 100°C for 3 hours for removing moisture. The homogenized sample was placed in a PVC cylindrical

container. The container was sealed hermitically and externally using a cellophane tape and kept aside for about a month to ensure equilibrium between ^{226}Ra and its daughters and ^{228}Ra and its daughters before being taken for measurement and analysis.

2. Measurement and analysis

The specific activities of natural (^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th) and anthropogenic (^{137}Cs) radionuclides in all of 24 surface beach sand samples were determined by using a high-purity germanium detector (HPGe, EG&G ORTEC Model GEM) and gamma spectrometry analysis system at advanced laboratory, Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization) (TINT). The detector was enclosed in a massive 10 cm thick lead shielding. Geometric efficiency for beach sand matrices in the container was determined by the IAEA Soil-375 reference materials (International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna, Austria). Counting time interval was 10800 s. The background spectrum was recorded immediately after or before the sample counting.

3. Radiological hazard evaluation and radioactive contour maps (RCM) creation

Four radiological hazard indices which are gamma absorbed dose rate (D), radium equivalent activity (Ra_{eq}) external hazard index (H_{ex}) and annual external effective dose rate (AED_{out}) (Singh, *et al.,* 2005 and Veiga *et al*., 2006), for the investigated area were studied and evaluated. By using a special computer program, radioactive contour maps (RCM) of specific activities of natural and anthropogenic radionuclides for Ao Noina could be also studied and created in this report.

RESULTS AND DISCUSSION

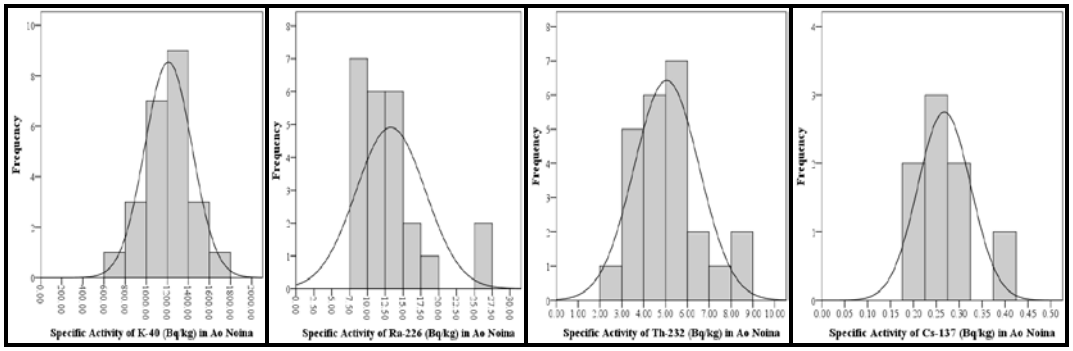
1. Frequency distribution of specific activities of natural (^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th) and anthropogenic (^{137}Cs) radionuclides

The frequency distribution of specific activities of natural (^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th) and anthropogenic (^{137}Cs) radionuclides in 24 surface beach sand samples collected from Ao Noina beach in Rayong province were studied and analyzed by using a statistic computer program and all results were presented in the following Fig. 1.

2. Median values of natural (^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th) and anthropogenic (^{137}Cs) radionuclides and comparison.

It was found that the frequency distribution were asymmetrical distribution with the skewness of -0.14, 1.45, 0.77 and 1.31, respectively. For this reason, the median values of ^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{137}Cs which were 1224.20 ± 96.27, 12.37 ± 1.84, 4.96 ± 0.71 and 0.27 ± 0.11 Bq/kg, for Ao Noina in Rayong province, should be selected for calculation the corresponding radiological hazard evaluation in the study area.

The results were also compared with the Office of Atoms for Peace (OAP) annual report data, Thailand and global radioactivity measurement and evaluations as shown in Table 1.



(a) (b) (c) (d)

Figure 1 Frequency distribution of specific activities of (a) ^{40}K (b) ^{226}Ra (c) ^{232}Th and (d) ^{137}Cs in 24 surface beach sand samples collected from Ao Noina in Rayong province.

Table 1 Comparison of median values of natural (^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th) and anthropogenic (^{137}Cs) radionuclides and radiological hazard indices in 24 surface beach sand samples collected from Ao Noina in Rayong province with some research data in Thailand, Office of Atoms for Peace (OAP) annual report data (OAP, 1990 - 2000), worldwide mean and UNSCEAR (UNSCEAR, 1988,1993, 2000).

Locations	Specific Activity (Bq/kg)				Radiological Hazard Indices			
	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{137}Cs	D (nGy/h)	Ra_{eq}(Bq/kg)	H_{ex}	AED_{out}(mSv/y)
Phuket province								
-Patong beach	3538.09 ± 959.56	29.72 ± 11.48	32.71 ± 7.51	3.28 ± 1.03	180.56 ± 49.70	348.93 ± 96.11	0.94 ± 0.26	0.22 ± 0.06
-Naiyang beach	1648.27 ± 702.98	14.62 ± 6.54	18.10 ± 4.22	1.19 ± 0.66	86.25 ± 34.75	167.42 ± 66.70	0.45 ± 0.18	0.11 ± 0.04
Phang Nga province								
-Takua Pa and Thai Muang beaches	1069.99 ± 119.43	40.39 ± 4.30	41.15 ± 3.65	N.A.	88.55 ± 9.20	181.62 ± 18.71	0.49 ± 0.05	0.11 ± 0.01
Krabi province								
-Ao Nang beach	330.73	4.60	5.78	N.A.	19.41	38.33	0.10	0.02
-Noppharat Thara beach	307.60	5.31	5.28	N.A.	18.47	36.55	0.10	0.02
Trang province								
-Pakmeng beach	57.30	23.10	6.90	N.A.	17.32	37.38	0.10	0.02
Surat Thani province								
-Chaweng beach	373.30	18.85	23.53	N.A.	38.80	81.24	0.22	0.05
Ranong province								
-Praphat beach	63.86 ± 2.28	39.98 ± 1.02	17.46 ± 0.63	N.A.	31.95 ± 0.96	69.86 ± 2.10	0.19 ± 0.01	0.04 ± 0.01
Songkhla province								
-Maharat beach	895.97 ± 122.52	39.28 ± 3.27	42.06 ± 2.34	N.A.	81.40 ± 8.04	168.42 ± 16.05	0.45 ± 0.04	0.10 ± 0.01
-Sai Kaew beach	726.91± 115.41	21.79 ± 2.50	15.69 ± 1.72	1.52 ± 0.47	49.91 ± 7.00	100.20 ± 13.85	0.27 ± 0.04	0.06 ± 0.01
-Samila beach	868.51 ± 118.42	30.50 ± 4.22	23.31 ± 2.22	N.A.	64.54 ± 8.23	130.71 ± 16.51	0.35 ± 0.04	0.08 ± 0.01
-Chalatat beach	488.05 ± 105.21	28.58 ± 3.84	30.11 ± 2.06	2.08 ± 0.71	52.14 ± 7.41	109.21 ± 14.89	0.29 ± 0.04	0.06 ± 0.01
-Na Thab beach	1044.54 ±122.25	23.97 ± 3.02	23.76 ± 2.04	2.04 ± 1.17	69.10 ± 7.72	138.38 ± 15.34	0.37 ± 0.04	0.08 ± 0.01
-Sakom beach	1028.92 ± 130.68	31.53 ± 3.18	24.98 ± 2.00	2.32 ± 0.69	72.69 ± 8.12	146.47 ±16.09	0.40 ± 0.04	0.09 ± 0.01
-Soi Sawan beach	1869.32 ± 183.33	36.73 ± 3.88	31.61 ± 2.68	4.00 ± 1.10	114.02 ± 11.05	225.87 ± 21.83	0.61 ± 0.06	0.14 ± 0.01
Rayong province								
-Ao Noina[a]	**1224.20 ± 96.27**	**12.37 ± 1.84**	**4.96 ± 0.71**	**0.27 ± 0.11**	**59.47 ± 5.27**	**113.72 ± 10.26**	**0.31 ± 0.03**	**0.07 ± 0.01**
OAP	511.04 ± 7.04	171.55 ± 3.13	211.19 ±1.98	1.13 ± 0.49	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Worldwide mean	400	35	30	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
UNSCEAR	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	**55**	**370**	**1**	**0.48**

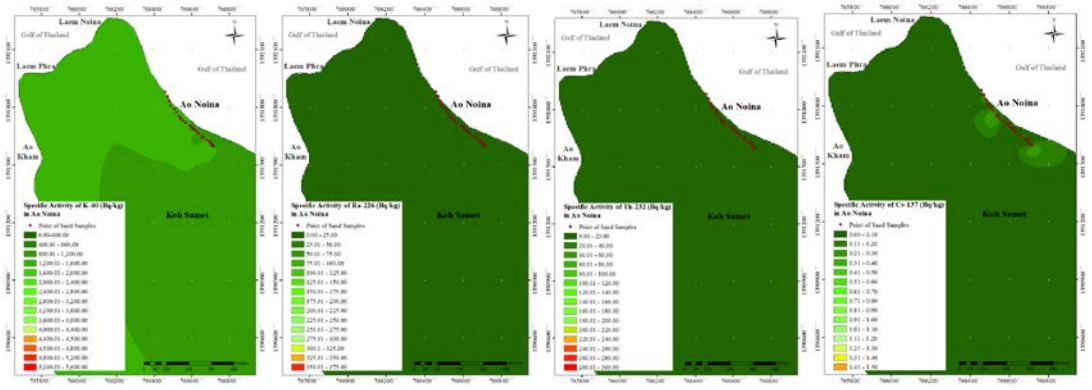
[a] Present study

3. Radiological hazard evaluation and radioactive contour maps (RCM) in the investigated area.

Furthermore, by using the median values of specific activities of natural radionuclides (^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th) for Ao Noina in Rayong province, four radiological hazard indices were also calculated and presented in Table 1 for the investigated area. Moreover, the results were also compared with some research data in Thailand and UNSCEAR as shown in the same table. Moreover, four radioactive contour maps (RCM) of specific activities of natural and anthropogenic radionuclides for the studied area were also created and shown in Fig. 2 by using a special computer program.

From Table 1, we can see that the specific activity of ^{40}K in Ao Noina was mostly *higher* than almost all of research data in Thailand, OAP research data and worldwide mean (except in Patong and Naiyang beaches in Phuket province (Kessaratikoon *et al*., 2013) and Soi Sawan beach in Songkhla province (Kessaratikoon *et al*., 2017). The specific activities of ^{226}Ra in the studied area was mainly *lower* than some research data in Thailand, OAP research data and worldwide mean but higher than the data of Ao Nang (Kessaratikoon, Rhian-nui and Boonkrongcheep, 2013) and Nappharat Thara beaches (Kessaratikoon, Kumnurak and Boonkrongcheep, 2013) in Krabi province. Furthermore, the specific activity of ^{232}Th in the investigated area was essentially *lower* than almost all research data in Thailand, OAP research data and worldwide mean. Moreover, the specific activity of ^{137}Cs in Ao Noina was also *lower* than all research data in Thailand, OAP research data and worldwide mean.

According to four radiological hazard indices in the study area as also shown in Table 1, we can see that the value of D was 59.47 ± 5.27 nGy/h which was *higher than* some research data in Thailand (such as Ao Nang and Nappharat Thara beaches, Pakmeng beach (Kessaratikoon *et al*., 2010), Chaweng beach (Kessaratikoon *et al*., 2009), Praphat beach (Kessaratikoon *et al*., 2016) and Sai Kaew beach and higher than 55 nGy/h as reported by UNSCEAR. This calculated value of D in the studied area was also lower than in Patong and Naiyang beaches in Phuket province, Takua Pa and Thai Muang beaches in Pang-Nga province (Kessaratikoon *et al*., 2014), Maharat, Samila, Na Thab, Sakom and Soi Sawan beaches in Songkhla province. The value of Ra_{eq} in Ao Noina beach in Rayong province was *higher than* about 1.04 – 3.11 times to some research data in Thailand which is *less than* 370 Bq/kg, which are the acceptable value for safe use. The values of H_{ex} obtained in this study was equal to 0.31 ± 0.03 which were *less than* unity. The calculated AED_{out} for the Ao Noina was also determined and equal to 0.07 ± 0.01 mSv/y which *lower than* the worldwide average value of 0.48 mSv/y as presented by UNSCEAR.



(e) (f) (g) (h)

Figure 2 Radioactive contour maps (RCM) of specific activities of (e) ^{40}K (f) ^{226}Ra (g) ^{232}Th and (h) ^{137}Cs in Ao Noina beach sand samples at Koh Samet in Rayong province.

Moreover, from the radioactive contour maps (RCM) as shown in Fig. 2, we can see that the specific activities values of natural and anthropogenic radionuclides in the investigated area were in the *same level* of radioactivity from the natural background radiation.

CONCLUSION

The median values of specific activity of natural (^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th) and anthropogenic (^{137}Cs) radionuclides in 24 surface beach sand samples collected from Ao Noina in Rayong province were comparable to research data in Thailand, OAP research data and worldwide mean. Hence, three from four values of radiological hazard indices in the studied area were *lower than* the recommend values which reported by UNSCEAR. For this reason, the radioactive contaminants after the oil spill in the Gulf of Thailand on July 27, 2013 would *not* have a *significant effect* on beach sand samples of the investigated area.

ACKNOWLEDGEMENTS

The investigation was fully supported by Research and Development Institute Thaksin University (RDITSU). The authors wish to thank Dr. Pornthep Nisamaneepong, executive director of Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization) (TINT) for his generous permission to us to use some of standard reference materials (IAEA Soil-375), laboratory and High-Purity Germanium (HPGe) detectors for calibration, measurement and analysis in this study. The authors are particularly indebted to some of undergraduate and graduate students for their works and patience in samples collection, measurement and analysis some parts of these data.

REFERENCES

Arogunjo, A.M., H.O. Ohenhen and S.P. Olowokere. (2004a). A re-evaluation of occupancy factors for effective dose estimate in tropical environment. **Radiation Protection Dosimetry**. 112: 259-265.

Casarotto, A., W. Jiraphanvanich, A. Kampa, W. Limpiwattakee, P. Luangaramvej, C. Wallace and J. Whyte. 2014. **Documentation and analysis of the Rayong oil spill characterizing the health, economic, and social impacts of the incident and response.** An interactive qualifying project report for the degree of bachelor of science. Worcester Polytechnic Institute.

Chad-Umoren, Y. E. 2012. Ionizing radiation profile of the hydrocarbon belt of Nigeria, pp. 407-432. *In* M. Nenoi, ed. **Current Topics in Ionizing Radiation Research**. InTech, Rijeka, Croatia.

IAEA. 2010. Radiation protection and the management of radioactive waste in the oil and gas industry.

Training course series No. 40. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna.

Kessaratikoon, P., J. Rhian-nui and R. Boonkrongcheep. 2013. Frequency distribution of specific activities of natural radionuclides and radiological hazard indices in beach sand samples from Ao Nang beach in Krabi province, Thailand. pp. 1111 - 1121. ***In*** **Proceedings of the 23rd Thaksin University Annual Conference "Green Society: Food and Energy Security"**. 22-25 May, 2013. Thaksin University, Songkhla, Thailand.

_____ N. Choosiri, P. Kongratana, R. Boonkrongcheep and U. Youngchauy. 2013. Frequency distribution and radiological hazard assessment of specific activities of natural anthropogenic radionuclides in beach sand from Patong and Naiyang beaches in Phuket province, Thailand. pp. 55 – 62. ***In*** **Proceedings of the 39th Congress on Science and Technology of Thailand (STT 39)**, 21-23 October 2013, The Science Society of Thailand under the Patronage of His Majesty the King, Bangkok, Thailand.

_____ P. Kumnurak and R. Boonkrongcheep. 2013. Measurement and analysis of specific activities of natural radionuclides in beach sand samples from Noppharat Thara beach in Krabi province, Thailand. pp.155. ***In*** **Proceedings of the 5th Walailak Research National Conference**, 1-2 August, 2013. Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand.

_____ R. Boonkrongcheep and N. Choosuwan. 2016, Monitoring on natural radioactivity in beach sand samples collected from Praphat beach Suk Samran

district, Ranong province, Thailand. pp. 44 - 52. ***In*** **Proceedings of the 2nd Environment and Natural Resources International Conference (ENRIC 2016): Interdisciplinary Approaches to Save Future Earth Environment,** 13-15 November, 2016. Mahidol University, Bangkok, Thailand.

_____ R. Boonkrongcheep, N. Choosiri, M. Daoh and S. Udomsomporn. 2017. Specific activities and radiological hazard assessment in beach sand samples in Songkhla province, Thailand after Fukushima Dai-Ichi nuclear power plant accident in Japan. **Journal of Physics: Conference Series.** 860: 1-8. (doi:10.1088/1742-6596/860/1/012007).

_____ S. Ramunset and R. Boonkrongcheep. 2014. A determination of natural radioactivity and Radiological hazard assessment in beach sand samples from Takua Pa and Thai Mueang districts in Phang Nga province (Thailand) after the 2004 tsunami. pp. 63 - 70. ***In*** **Proceedings of the 40th Congress on Science and Technology of Thailand (STT 40).** 2-4 December, 2014. The Science Society of Thailand under the Patronage of His Majesty the King Bangkok, Thailand.

_____ S. Thaneerat and U. Youngchauy. 2009. Measurement of natural radioactivity in beach sand samples from Chaweng beach amphur Ko Samui in Surat Thani province. pp. 1 – 6. ***In*** **Proceedings of the 35th Congress on Science and Technology of Thailand, (STT 35),** 15-17 October, 2009. The Science Society of Thailand under the Patronage of His Majesty the King, Bangkok, Thailand.

_____ W. Ayusuk and U. Youngchauy. 2010. Natural radioactivity in beach sands of the Pakmeng beach in Trang province, Thailand, **Thai Journal of Physics Series 5.** 5: 284-289.

Office of Atoms for Peace (OAP). 1990-2000. **OAP Annual Academic Report in 1990-2000.** Ministry of Science and Technology, Bangkok, Thailand.

Singh, S., A. Rani, and R. K. Mahajan. 2005. ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry, **Radiation Measurements.** 39(4): 431 – 439.

UNSCEAR. 1988, 1993, 2000. **Sources and Effects of Ionizing Radiation.** United Nations, New York.

Veiga, R., N. Sanches, R.M. Anjos, K. Macario, J. Bastos, M. Iguatemy, J.G. Aguiar, A.H.A. Santos, B. Mosquera, C. Carvalho, M.B. Filho and N.K. Umisedo. 2006. Measurement natural radioactivity in Brazilian beach sands, **Radiation Measurements.** 41(2): 189-196.

การศึกษาพื้นผิวของแมงกานีสออกไซด์และโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ที่เคลือบบนเม็ดเซรามิก

Surface study of manganese oxides and iron-based metal-organic frameworks coated on ceramic balls

นิชาภา สุพรรณฝ่าย[1] จักรภพ พันธศรี[2] วิษณุ แทนบุญช่วย[2,3] มงคลชัย อัศวดิษฐเลิศ[4] และ ภุมรินทร์ คำเดชศักดิ์[3,4,5*]

Nichapa Supannafai[1], Jakkapop Phanthasri[2], Visanu Tanboonchuy[2,3], Mongkolchai Assawadithalerd[4], and Pummarin Khamdahsag[3,4,5*]

บทคัดย่อ

แมงกานีสออกไซด์ (K-OMS2) และ โครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Fe-BTC) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับแบบผงที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อการประยุกต์ใช้ได้จริงจึงต้องมีการขึ้นรูปวัสดุดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเคลือบ K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิกโดยใช้กระบวนการเขย่าหมุนรอบเชิงกล ในอัตราส่วนผง K-OMS2 และ Fe-BTC ต่อเม็ดเซรามิกเท่ากับ 1:10 1:50 และ 1:100 แล้วศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายของธาตุ (Scanning electron microscopy with energy dispersive x-ray spectrometry; SEM-EDS) ผลการ ศึกษาพบว่า เปอร์เซ็นต์การเคลือบโดยรวมเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ อัตราส่วน 1:10>1:50>1:100 และความเรียบสม่ำเสมอของพื้นผิวที่ถูกเคลือบจากผล SEM เรียงจากน้อยไปมากในอัตราส่วน 1:10<1:50<1:100 นอกจากนี้ การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบใน K-OMS2 และ Fe-BTC จากผล SEM-EDS พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับ K-OMS2 คือ 1:50 และ Fe-BTC คือ 1:10 และ1:50

ABSTRACT

Manganese oxides (K-OMS2) and iron-based metal-organic frameworks (Fe-BTC) are used as high efficient catalyst and adsorbent powder. For real applications, immobilization of the powders on supports is necessary. This study aimed to coat K-OMS2 and Fe-BTC powders on ceramic ball by using mechanical orbital shaking technique with each powder: ceramic ball ratios of 1: 10, 1: 50, and 1: 100. Scanning electron microscopy with energy dispersive x-ray spectrometry (SEM-EDS) technique was used for surface and elemental mapping study. It was found that percentage of coating ratio was decreased in order 1:10>1:50>1:100. Smoothness and uniformity of coating was increased with increasing of coating ratio (1:10<1:50<1:100). In addition, elemental mapping and distribution from SEM-EDS revealed the optimum coating ratio of 1:50 for K-OMS2 (coated) and 1:10 and 1:50 for Fe-BTC (coated).

Keywords : K-OMS2, Fe-BTC, Coating, SEM, EDS, Ceramic ball

* Corresponding author; e-mail address: pummarin.k@chula.ac.th

[1]สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330 [2]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002 [3]โปรแกรมวิจัยการจัดการสารพิษในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ [4]ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย และ [5]สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[1]Interdisciplinary Program of Environmental Science, Graduate School, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand [2] Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

[3]Research Program of Toxic Substance Management in Mining Industry, [4]Center of Excellence on Hazardous Substance Management, and [5]Environmental Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

คำนำ

แมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide octahedral molecular sieve ชนิด K-OMS2) และโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Iron-based metal-organic framework ชนิด Fe-BTC) คือวัสดุสังเคราะห์ที่มี ลักษณะเป็นผงสีดำและสีส้ม ตามลำดับ ปัจจุบันมีการนำ K-OMS2 มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างแพร่หลาย โดยเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง ในขณะที่ Fe-BTC นำมาใช้ในด้านต่างๆ เช่น การเร่งปฏิกิริยาด้วย ไฟฟ้า การเป็นเซนเซอร์ (Babu et al., 2010) และการดูดซับ (García et al., 2014; Zukal et al., 2015; Zhu et al., 2012) การศึกษาโดยคณะวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการสังเคราะห์ K-OMS2 และ Fe-BTC เพื่อกำจัดการปนเปื้อนของ As(III) ในน้ำ โดยการใช้งานของ K-OMS2 และ Fe-BTC แบบผงในถังปฏิกรณ์แบบกะ (Phanthasri et al., 2018) K-OMS2 และ Fe-BTC ซึ่งมีลักษณะเป็นผงถึงแม้จะมีประสิทธิภาพการทำงานสูง แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานจริง โดยเฉพาะการกรองผงดังกล่าวออกจากน้ำที่บำบัดแล้ว และการใช้งานในระบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous system) เพื่อการใช้ประโยชน์เชิงอุตสาหกรรม การขึ้นรูปของ K-OMS2 และ Fe-BTC จึงมีความจำเป็น แนวทางในการขึ้นรูปมีหลายรูปแบบ เช่น การเคลือบ (Coating) แม่แบบ (Templating) การเทหล่อ (Slip casting) การทำแกรนูล (Granulation) การอัดเป็นแท่ง (Extrusion) และการอัดเม็ด (Tableting) เป็นต้น วิธีขึ้นรูปแต่ละวิธีล้วนมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกัน การเคลือบเป็นเทคนิคที่มีความนิยมและมีความสำคัญในการสร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ เนื่องจากมีกระบวนการไม่ยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายต่ำ อีกทั้งมีความเสถียรของผลิตภัณฑ์ และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อย (Akhtar et al., 2014)

การศึกษานี้จึงสนใจนำผง K-OMS2 และ Fe-BTC มาขึ้นรูปด้วยวิธีเคลือบบนเม็ดเซรามิกด้วยอัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 โดยใช้กระบวนการเขย่าหมุนรอบเชิงกล (Mechanical orbital shaking technique) ความเร็วรอบ160 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำ K-OMS2 และ Fe-BTC ที่เคลือบบนเม็ดเซรามิก มาศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) และศึกษาการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray spectrometry (EDS) เพื่อเลือกอัตราส่วนการ เคลือบที่ เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการศึกษาการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

การสังเคราะห์แมงกานีสออกไซด์ (K-OMS2)

เตรียมสารละลายแมงกานีส(II)อะซิเตท ($Mn(CH_3COO)_2$) ความเข้มข้น 0.333 M ปริมาตร 40 mL และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ความเข้มข้น 0.25 M ปริมาตร 40 mL จากนั้นหยดสารละลาย $KMnO_4$ ลงในสารละลาย $Mn(CH_3COO)_2$ ช้าๆ พร้อมกับปั่นกวนสารผสมทั้งสอง และกวนหลังการผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องเพื่อทำปฏิกิริยา จากนั้นปรับ pH ของสารผสมให้มีค่า < 3.5 โดยใช้กรดอะซิติก (CH_3COOH) และกวนต่อเนื่องอีก 1 ชั่วโมง จะได้สารที่มีสีน้ำตาลเข้ม นำสารดังกล่าวเทลงในหม้ออัดความดัน (Autoclave) และอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal treatment process) จากนั้นนำหม้ออัดความดันออกจากเตาอบและตั้งทิ้งไว้ให้เย็น สารที่ได้จะมีลักษณะเป็นของผสมระหว่างของแข็งที่เป็นอนุภาคและของเหลวสีน้ำตาลเข้มทำการล้างและแยกสารอนุภาคของแข็งออกด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงหลายๆ ครั้ง จนได้ pH = 7 เทสารผสมลงใน

ถ้วยระเหยและนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้สารที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ (Phanthasri et al., 2018)

การสังเคราะห์โครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Fe-BTC)

เตรียมสารละลายไอรอน(III)คลอไรด์ ($FeCl_3$) ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 75 mL และสารละลายเบนซีนไตรเมซิแอซิด (BTC) ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 75 mL จากนั้นผสมสารละลายทั้ง 2 ชนิด แล้วกวนสารผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 30-60 นาที จะได้สารผสมมีสีส้มลักษณะคล้ายวุ้น เทสารดังกล่าวลงในหม้ออัดความดัน อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จากนั้นนำออกจากเตาอบและตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ทำการล้างและแยกสารอนุภาคของแข็งออกด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงหลายๆ ครั้ง จนได้ pH = 7 เทสารผสมลงในถ้วยระเหยและนำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้สารที่มีลักษณะเป็นผงสีส้ม (Phanthasri et al., 2018)

การเคลือบ K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิก

ชั่ง K-OMS2 Fe-BTC และเม็ดเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm โดยใช้อัตราส่วน K-OMS2:เม็ดเซรามิก และ Fe-BTC:เม็ดเซรามิก เท่ากับ 1:100 1:50 และ 1:10 นำไปเหวี่ยงด้วยเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกล (Mechanical orbital shaking technique) ความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดเซรามิกที่เคลือบด้วย K-OMS2 และ Fe-BTC อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ K-OMS2 และ Fe-BTC ที่ขึ้นรูปแล้วซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมสีดำและสีส้ม ซึ่งจะเรียกว่า K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ตามลำดับ

การศึกษาพื้นผิวของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM) และการกระจายตัวของธาตุ (Energy dispersive x-ray spectrometry; EDS)

การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300 โตเกียว ประเทศญี่ปุ่น และ EDS ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-Max^N 20 สหราชอาณาจักร เริ่มต้นตัวอย่างจะถูกอบที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำตัวอย่างไปติดบนแท่งโลหะวงกลม แล้วนำไปเคลือบแพลตตินัม เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้า สุดท้ายนำตัวอย่างเข้าไปในเครื่อง SEM/EDS เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการเคลือบ K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิก

การศึกษาการเคลือบ K-OMS2:เม็ดเซรามิก และ Fe-BTC:เม็ดเซรามิก ด้วยอัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 ตามลำดับ แสดงใน Table 1 เมื่อสังเกตลักษณะพื้นผิวที่เคลือบด้วย K-OMS2 และ Fe-BTC พบว่าที่อัตราส่วน 1:10 มีลักษณะไม่เรียบ ขรุขระอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องจากมีปริมาณผง K-OMS2 และ Fe-BTC มากเกินพอ อัตราส่วน 1:50 และ 1:100 ของ K-OMS2 (coated) ไม่สามารถระบุลักษณะพื้นผิวที่เคลือบได้มากนัก เนื่องจากพื้นผิวมีสีเข้ม ในขณะที่อัตราส่วน 1:50 และ 1:100 ของ Fe-BTC (coated) มีลักษณะพื้นผิวไม่ขรุขระมาก และมีความเรียบมากกว่าอัตราส่วน 1:10 เมื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ที่เคลือบอยู่บนเม็ดเซรามิกที่

เตรียมด้วยอัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 พบว่า K-OMS2 (coated) มีการเคลือบติดบนเม็ดเซรามิก 0.55 0.61 และ 0.45% ตามลำดับ ในขณะที่ Fe-BTC (coated) มีการเคลือบติดบนเม็ดเซรามิก 2.32 0.95 และ 0.53% ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณผง K-OMS2 และ Fe-BTC ที่ใช้ในการเคลือบบนเม็ดเซรามิก น้อยลง เปอร์เซ็นต์การเคลือบจะมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วน 1:10>1:50>1:100 บ่งบอกถึงความหนาและลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันจากการเคลือบด้วยอัตราส่วนที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้ยังไม่สามารถระบุอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

Table 1 Appearance, coating weight, and coating percentage of K-OMS2 (coated) and Fe-BTC (coated)

K-OMS2 or Fe-BTC: Ceramic ball ratio	K-OMS2 (coated)			Fe-BTC (coated)		
	Appearance	Powder weight (g)	% coating	Appearance	Powder weight (g)	% coating
1:10		0.0055	0.55		0.0237	2.32
1:50		0.0061	0.61		0.0096	0.95
1:100		0.0045	0.45		0.0053	0.53

ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM

ลักษณะสัณฐานบริเวณพื้นผิวของเม็ดเซรามิก K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) อัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 จากการใช้เทคนิค SEM แสดงใน Figure 1 กำลังขยาย 20 เท่า ลักษณะพื้นผิวโดยรวมของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) อัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 ใน Figure 1 (b-d) และ (e-g) ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเม็ดเซรามิกแม่แบบใน Figure 1 (a) พบว่าพื้นผิวของอัตราส่วน 1:10 มีลักษณะไม่เรียบ ขรุขระ เป็นแผ่นใหญ่หนาและร่องลึกอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณผงของ K-OMS2 และ Fe-BTC มีมากเกินพอ แสดงถึงความไม่สม่ำเสมอในการเคลือบ ในขณะที่อัตราส่วน 1:50 และ 1:100 พบลักษณะดังกล่าวน้อยลง โดยพบว่าพื้นผิวที่อัตราส่วน 1:100 มีความเรียบมากกว่า 1:50 ดังนั้นอัตราส่วนที่ทำให้พื้นผิววัสดุ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) เรียบสม่ำเสมอจากมากไปน้อย คือ 1:100 1:50 และ 1:10 ตามลำดับ ใน Figure 1 (h) K-OMS2 (coated) อัตราส่วน 1:10 กำลังขยาย 15,000 เท่า พบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นแท่งที่มีการหัก ขนาดต่างๆ และมีการเกาะกลุ่มรวมกัน เนื่องจากผ่านการเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลานานถึง 24 ชั่วโมง แต่ยังคงโครงสร้างพื้นฐานของ K-OMS2 ที่มีลักษณะเป็นแท่ง (จักรภพ, 2560) ในขณะที่ลักษณะพื้นผิวของวัสดุ Fe-BTC (coated) อัตราส่วน 1:10 ใน Figure 1 (i) มีลักษณะเป็นก้อนหลายขนาด ดังนั้น

สามารถยืนยันได้ว่าอัตราส่วน 1:100 ทั้งจาก K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ทำให้มีพื้นผิวเคลือบที่เรียบสม่ำเสมอมากที่สุด

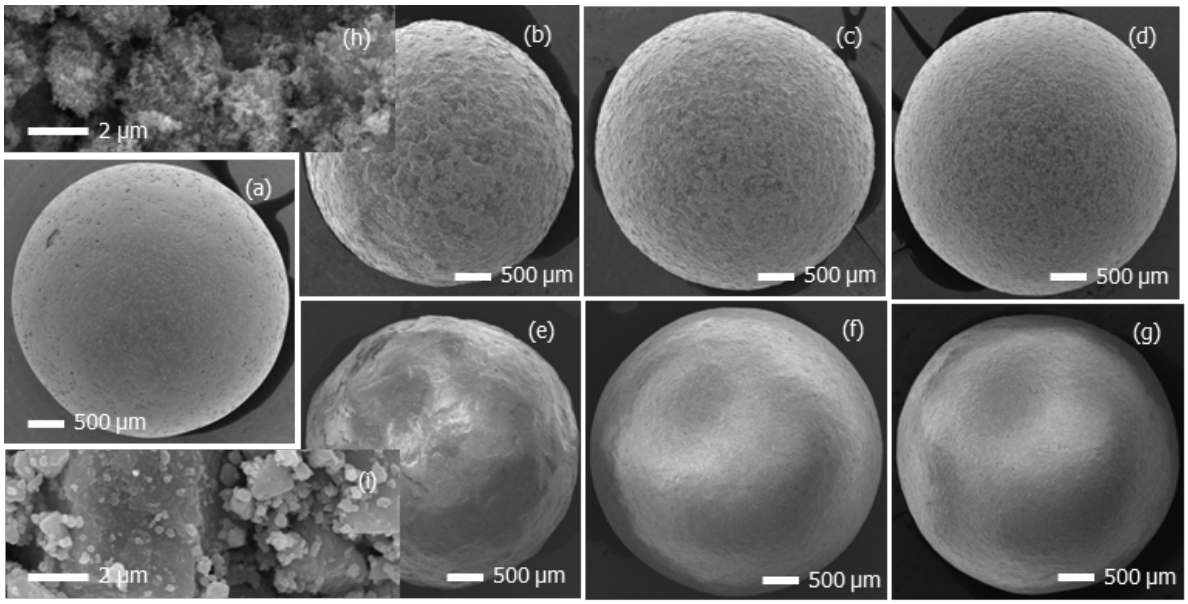


Figure 1 SEM images (20x) of Ceramic ball (a), K-OMS2 (coated) 1:10 (b) with its inset (15,00X) (h), 1:50 (c), 1:100 (d), and Fe-BTC (coated) 1:10 (e) with its inset (15,000X) (i), 1:50 (f), 1:100 (g)

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค SEM/EDS และการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค EDS

ผลการศึกษาการกระจายตัวของธาตุและปริมาณธาตุใน K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated)อัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 แสดงใน Table 2-4 แมงกานีส (Mn) และออกซิเจน (O) กระจายตัวในทุกอัตราส่วนการเคลือบ โดยมีปริมาณ Mn 46.19- 47.78% และ O ปริมาณ 36.35- 37.79% ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ K-OMS2 (จักรภพ, 2560) นอกจากนี้ยังพบการกระจายตัวของธาตุอลูมิเนียม (Al) และซิลิคอน (Si) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเม็ดเซรามิก จึงพบ Al (3.97%) Si (5.17%) กระจายตัวเป็นกลุ่มๆ โดยจะเห็นว่าจะพบการกระจายตัวมากในอัตราส่วน 1:10 เนื่องจากพื้นผิวหนา แต่ขรุขระ เป็นร่องลึก ทำให้เกิดช่องว่าง และพบมาก ขึ้นในอัตราส่วน 1:100 แต่การกระจายตัวของธาตุ Al (4.01%) Si (5.89%) มีความแตกต่างจากอัตราส่วน 1:10 กล่าวคือ พบการกระจายทั่วทุกพื้นที่ของภาพ ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเคลือบบาง สำหรับ K-OMS2 (coated) อัตราส่วน 1:50 พบการกระจายตัวของธาตุ Al (3.11%) Si (3.97%) บางเบาเพียงเล็กน้อย บ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวที่เคลือบด้วย K-OMS2 มีความสม่ำเสมอ สมบูรณ์ และมีความหนาที่ค่อนข้างเหมาะสมที่สุด

สำหรับการกระจายตัวของธาตุใน Fe-BTC (coated) ทั้ง 3 อัตราส่วน พบการกระจายตัวของเหล็ก (Fe) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ Fe-BTC น้อยมาก และมีปริมาณธาตุ Fe เพียง 0.17-1.27% ผลดังกล่าวไม่สอดคล้องกับการศึกษา Fe-BTC ก่อนหน้านี้ในลักษณะผง ซึ่งพบปริมาณธาตุ Fe สูงถึง 12.17% (จักรภพ, 2560) ทำให้มีความจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่ออธิบายสิ่งที่เกิดต่อไป อย่างไรก็ตาม Fe-BTC (coated) ยังคงพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในส่วนของ BTC โดยมีปริมาณธาตุ C 42.82-45.36% และ O 53.37-54.73% สำหรับการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si พบในอัตราส่วนเดียวคือ 1:100 แสดงถึงการเคลือบที่น้อยและบางเกินไปจนสามารถพบการกระจายตัวของธาตุ Al และ

Si ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเม็ดเซรามิกที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ ดังนั้นอัตราส่วนการเคลือบที่เหมาะสมของ Fe-BTC (coated) คือ 1:10 และ 1:50

จากผลการศึกษาพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM/EDS ทำให้ทราบว่าการเคลือบผง K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิกด้วยเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกล ณ ความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสม ทำให้ได้ข้อมูลเพื่อใช้เลือกอัตราส่วนการเคลือบที่เหมาะสมได้ระดับหนึ่ง นอกจากนี้การพบธาตุ Mn และ O ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ K-OMS2 สนับสนุนความเป็นไปได้ที่จะนำ K-OMS2 (coated) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดโลหะหนักโดยเฉพาะสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำสำหรับการศึกษาในอนาคต ส่วน Fe-BTC (coated) ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักนั้น แม้จะพบธาตุ C และ O แต่กลับแทบจะไม่พบธาตุ Fe ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักอีกอย่างของ Fe-BTC ผ่านเทคนิค SEM/EDS ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาการมีอยู่ของธาตุ Fe ใน Fe-BTC (coated) ด้วยเทคนิควิเคราะห์อื่นๆ ต่อไป อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์พื้นผิวของทั้ง K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้ประกอบการอธิบายกลไกการบำบัดโลหะหนักในอนาคตได้

Table 2 Mapping of elements on K-OMS2 (coated) surface at coating ratio of 1:10 (a-d), 1:50 (e-h), and 1:100 (i-l)

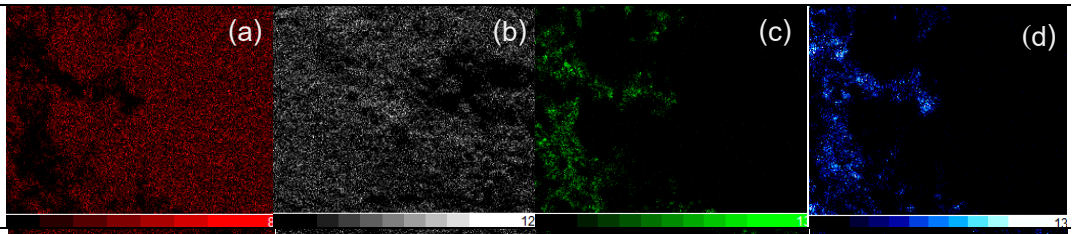
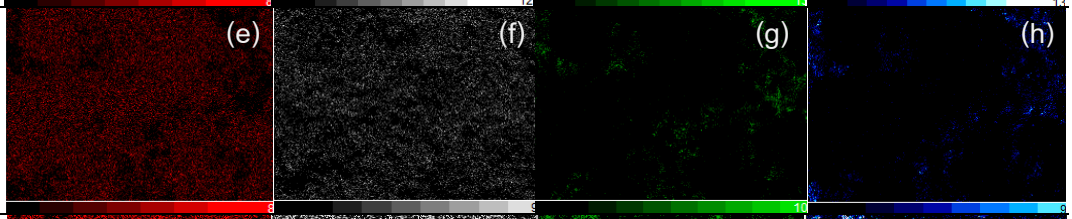
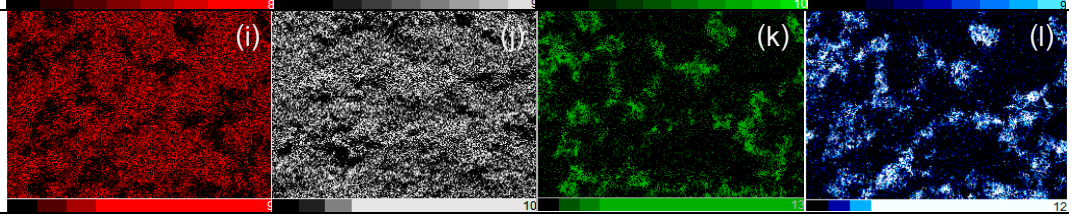
Ratio of K-OMS2: Ceramic ball	Mapping of element			
	Mn	O	Al	Si
1:10				
1:50				
1:100				

Table 3 Mapping of elements on Fe-BTC (coated) surface at coating ratio of 1:10 (a-e), 1:50 (f-g), and 1:100 (k-o)

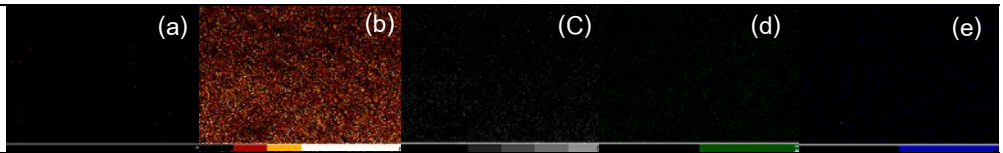
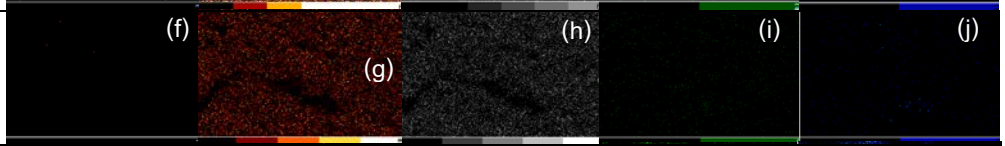
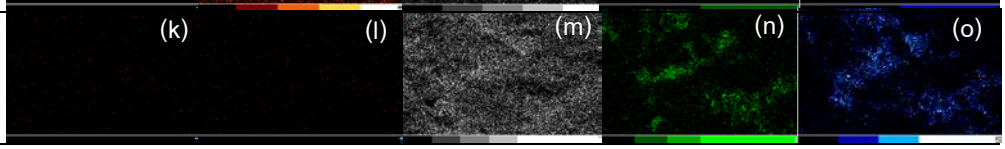
Ratio of Fe-BTC: Ceramic ball	Mapping of element				
	Fe	C	O	Al	Si
1:10					
1:50					
1:100					

Table 4 Weight of element (%) for K-OMS2/Fe-BTC: Ceramic ball

Ratio	Weight of element (%)								
	Al	Si	O	Mn	K	C	Fe	Others	Total
K-OMS2: ceramic ball									
1: 10	3.97	5.17	37.64	46.19	3.68	3.34	-	-	100
1: 50	3.11	3.97	37.79	47.74	3.87	3.53	-	-	100
1: 100	4.01	5.89	36.35	47.78	3.84	4.14	-	-	100
Fe-BTC: ceramic ball									
1: 10	-	-	53.37	-	-	45.36	1.27	-	100
1: 50	-	-	54.73	-	-	45.10	0.17	-	100
1: 100	1.58	2.03	53.46	-	-	42.82	0.11	-	100
Ceramic ball	14.55	20.46	55.44	-	1.14	5.28	-	1.52	100

สรุป

K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ถูกเตรียมขึ้นโดยใช้เทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกลด้วยอัตราส่วนของผง K-OMS2 และ Fe-BTC:เม็ดเซรามิก 1:10 1:50 และ 1:100 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ด้วยเทคนิค SEM-EDS ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกอัตราส่วนการเคลือบที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า เปอร์เซ็นต์การเคลือบของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) จะมากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณผง K-OMS2 และ Fe-BTC ที่สูงขึ้น การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM ทำให้ยืนยันได้ว่าอัตราส่วน 1:100 ทั้งจาก K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเคลือบน้อยที่สุด มีลักษณะพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอที่สุด การศึกษาการกระจายตัวและปริมาณของธาตุด้วยเทคนิค SEM-EDS พบว่า

K-OMS2 (coated) อัตราส่วน 1:50 มีการกระจายตัวของธาตุ Mn และ O ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ K-OMS2 ในลักษณะสม่ำเสมอกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และพบการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si เพียงเล็กน้อย แสดงถึงความเหมาะสมของปริมาณผง K-OMS2 ที่ใช้และความหนาของการเคลือบที่เกิดขึ้น ในขณะที่การกระจายของ Fe-BTC (coated) ไม่สามารถระบุการกระจายตัวของธาตุ Fe ได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ Fe-BTC อย่างไรก็ตาม ยังพบการกระจายของธาตุ C และ O โดยอัตราส่วนการเคลือบที่เหมาะสมของ Fe-BTC (coated) ได้แก่ 1:10 และ 1:50

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย และขอขอบคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมและศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

การอ้างอิง

จักรภพ พันธศรี. 2560. **การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอาร์เซไนต์โดยใช้แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับวัสดุโครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Akhtar, F., Andersson, L., Ogunwumi, S., Hedin, N. and Bergström, L. 2014. Structuring adsorbents and catalysts by processing of porous powders. **Journal of the European Ceramic Society** 34: 1643-1666.

Babu, F. K., Kulandainathan, A. M., Katsounaros, L., Rassaei, L., Burrows, D. A., Raithby, R. P. and Marken, F. 2010. Electrocatalytic activity of Basolite™ F300 metal-organic-framework structures. **Electrochemistry Communications** 12: 632-635.

García, R. E., Medina, L. M., Lozana, M. M., Pérez, H. I., Valero, J. M. and Franco, M. A. 2014. Adsorption of azo-dye organic framework material: Iron-Benzenetricarboxylate. **Materials** 7: 8037-8057.

Phanthasri, J., Khamdahsag, P., Jutaporn, P., Sorachoti, K., Wantala, K. and Tanboonchuy, V. 2018. Enhancement of arsenite removal using manganese oxide coupled with iron (III) trimesic. **Applied Surface Science** 427: 545-552.

Zhu, B.-J., Yu., X.-Y., Jia, Y., Peng, F.-M., Sun, B., Zhang, M.-Y., Luo, T., Liu, J.-H. and Huang, X.-J. 2012. Iron and 1,3,5-Benzenetricarboxylic metal–organic coordination polymers prepared by solvothermal method and their application in efficient As(V) removal from aqueous solutions. **The Journal of Physical Chemistry C** 116: 8601–8607.

Zukal, A., Opaasenko, M., Rubes, M., Nachtigall, P. and Jagiello, J. 2015. Adsorption of pentane isomers on metal-organic frameworks Cu-BTC and Fe-BTC. **Catalysis Today** 243: 69-75.

Comparative Phytochemistry of *Gonocaryum lobbianum* (Miers) Kurz (Cardiopteridaceae) and Its Bioactivity

Kongkidakorn Thaweepanyaporn[1], Nuttha Sanevas[1] and Srunya Vajrodaya[1*]

ABSTRACT

Phytochemical analyses of lipophilic extracts (chloroform) from leaves and stem bark of *Gonocaryum lobbianum*, a tree species in evergreen forest have been done by using chromatographic technique i.e. thin layer chromatography (TLC) and high performance liquid chromatography (HPLC). The lipophilic extracts were tested on *Chlorella* sp. (the representative of weed's cell). Growth and chlorophyll content were evaluated. The lipophilic leaf and stem bark extracts showed a little bit deference in TLC patterns, but the HPLC profiles are rather similar. In part of antialgal activity, lipophilic bark extract could inhibit *Chlorella* sp. growth at the concentration 1000 ppm. Chlorophyll a and carotenoid content were also less than control. While chlorophyll b was lesser inhibited. The leaf extract did not show significant activity when compared with the control. Therefore, *G. lobbianum* stem bark extract had high inhibitory effect against *Chlorella* sp. which could be evaluated by less chlorophyll a and carotenoid content.

Key words: *Gonocaryum lobbianum*, Phytochemistry, *Chlorella* sp. and Antialgal

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

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

INTRODUCTION

In nature, ecosystem is a resonance interactive and relationship between each species, the plants also live within, they produce primary metabolites by photosynthesis for growth, development and reproduction. In case of survival, the plants create secondary metabolites, which each plant has different types of compounds and various functions (Harborne, 1993).

In Southeast Asia, there are many forest types and dry deciduous forests distribute in every region, which have some variations. Plants in the genus *Gonocaryum*, family Cardiopteridaceae distribute only in Southeast Asia. In Thailand, there is only Gonocarum lobbianum (Miers) Kurz species which might be s rich source of useful secondary metabolites in the nature. *Gonocaryum* has been used as flatulence in Philippines (Quisumbing, 1978). Most of secondary metabolites in the genus *Gonocaryum* are flavonoids and secoiridoids (Kaneko *et al*., 1995).

In addition, green algae, *Chlorella* sp., will be used in biological assay because it was easily to study its activity mechanic in vitro and it can be used as representative of weed cell. It was studied in part of morphology, reproduction, and primary composition (Safi *et al*., 2014). *Chlorella* sp. has been used for biological test and studied for many compounds. (Sikka *et al*., 1971; Tantawy and *Gri*mme, 1982; Okey and Morkoq, 1994; Xia-li *et al*., 2007; Deng *et al*., 2014; Ma *et al*., 2015)

Our hypothesis is that the extracts from plants collected in nature can inhibit growth and can damage some pathogenic bacteria that cause serious infection. We conducted phytochemical analyses of lipophilic extracts (chloroform) from leaf and stem bark of *G. lobbianum*, using chromatographic technique, such as thin layer chromatography (TLC) and high performance liquid chromatography (HPLC). Specifically, we test the effect of leaf and stem bark extracts on *Chlorella* sp.

MATERIALS AND METHODS

1. Plant material

Mature leaves and stem bark of *Gonocaryum lobbianum* were collected for herbarium specimens and plant extractions from Trat Agroforestry Research and Training Station. Phytochemical analyses and biotest were conducted during July to December 2016. This genus distribute only in south east Asia and all *Gonocaryum* species are dioecious plants, shrubs or tree, leathery leaves , yellow petiole (important characteristic), small white-greenish flowers and black drupe (Sleumer, 1970). The specimen were identified and verified with Flora of Thailand vol. 2 part 1 (Sleumer, 1970) and comparisons with specimens at Bangkok Forest Herbarium (BKF).

2. Preparation of plant extractions

Leaves and stem bark were separated and dried under shade, chopped into small pieces and powdered, using a blender. The *Gonocaryum* powder was macerated in methanol (CH_3OH) and kept

in the dark at room temperature for one week. Subsequently, extracts were filtered through Whatman No.1 filter paper and then concentrated by rotary evaporation at 37–39ºC until the crude extracts were semi-solid. The concentrated crude extracts were separated into a hydrophilic extract in distilled water and lipophilic extract in chloroform. The lipophilic extracts were stored at a temperature below –45 ºC.

3. Isolated algal

For the bioactivity assays, plant lipophilic extracts were evaluated using *Chlorella* sp. that was isolated from wet soil in nursery, Department of Botany, Kasetsart University. The soil sample was collected and steaked plate in agar BBM medium until *Chlorella* sp. was absolutely pure. *Chlorella* sp. was subculture to liquid BBM medium

4. Antialgal screening

Lipophilic plant extracts were examined for inhibition of *Chlorella* sp. The cell stock was prepared in Bold's Basal medium for 1 week. The cell stock was measured Turbidity = 0.1 at wavelength 590 nm by spectrophotometry. The lipophilic plant extracts were diluted to 3 concentrations for each treatment; 0, 10.0 and 100.0 ppm together with 100.0 ppm methanol as control. The treatments were collected every 24 hour for 3 days. The collected samples were precipitated by centrifuge, then combined with dimethyl sulfoxide (DMSO) for 12 hours. The samples were measured at wavelength 470, 648, 664 nm by spectrophotometry then calculated chlorophyll content (Shoaf and Lium, 1976).

5. Chromatography techniques

One gram of lipophilic extracts was prepared for Dry Column Chromatography, using silica gel 60 Merck (0.2-0.5 mm, 35-70 mesh). The extracts were separated into fractions, according to polarity of compounds. The fractions from lipophilic extract were further and investigated with Thin Layer Chromatography (TLC) using pre-coated silica gel 60 F254 plates (20×20 cm; Merck) and a solvent system of chloroform : Hexane (6:4 v/v). Spot on TLC plate were visualised under UV irradiation (365 nm and 254 nm). The relative front (R_f) values of each fluorescented spots was determined. Samples of 10 mg/mL of lipophilic extracts in methanol (CH_3OH; HPLC grade, Merck) were prepared and filtered through a 0.45 µm nylon filter using a solvent system, methanol gradient 60–100% (HPLC grade; Merck) in aqueous buffer (0.015 M ortho-phosphoric acid pH 3 and 0.015 M tetrabutyl ammonium hydroxide). The HPLC analysis was done on an Agilent 1100 series and detected with UV photodiode arrays detector with wavelengths of 230 nm, 254 nm and 280 nm at the Scientific Instrumentation Center, Faculty of Science, Kasetsart University

RESULTS AND DISCUSSION

1. Qualitative chromatography analyses

Qualitative chromatography analyses

In the part of chromatography results, TLC showed the difference between leaf and stem bark extracts (Figure 1). The HPLC profiles (Figure 2) demonstrated one major group of peaks from both leaf and stem bark extracts but the significant UV spectra of leaf and stem bark extracts are difference. Leaf extract has two minor compound at retention time 12.220 and 15.688 while bark extract has two minor compounds, that close to each other, at retention time12.264 and 12.672.

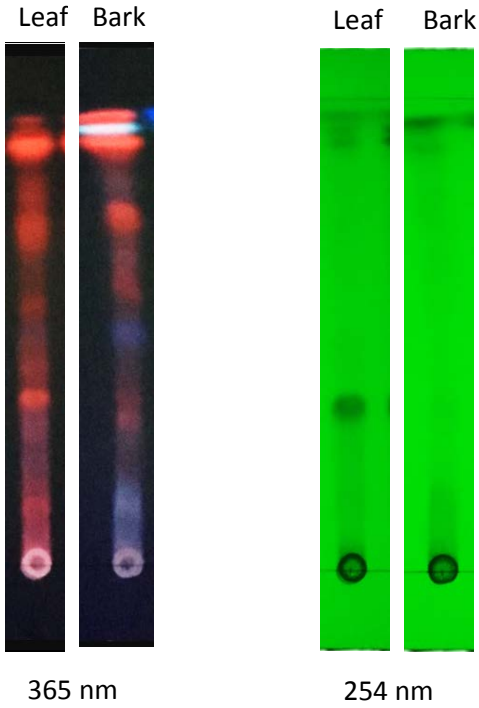


Figure 1 TLC profiles of lipophilic stem leaf and stem bark extracts from *G .lobbianum*

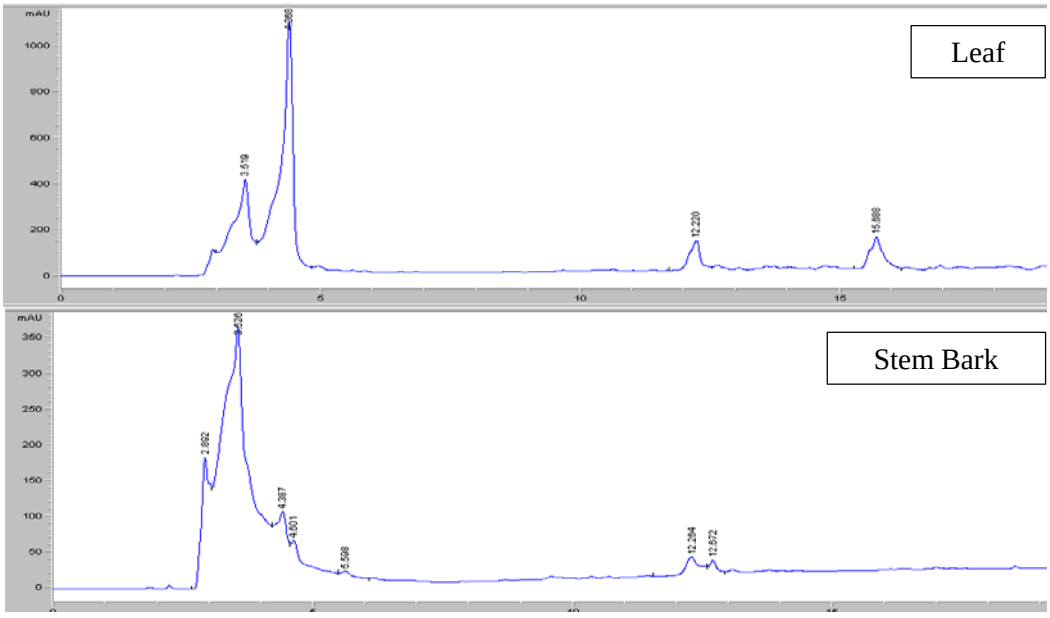


Figure 2 HPLC profiles of lipophilic stem leaf and stem bark extracts from *G. Lobbianum*

2. Bioactivity test with *Chlorella* sp.

Lipophilic extract have compounds that interfered spectrophotometer measured. Therefore post treatment *Chlorella* sp. was determined and used for calculated to the correct value.

Effect of leaf extract to biomass of *Chlorella* sp. in 72 hour

Chlorophyll a content in 72 hour was found, the 1000 ppm concentration has effect increasing chlorophyll a content throughout 0 hour to 72 hour compared with the 0 ppm concentration. The 100 ppm concentration decreased chlorophyll a content around 0 hour to 48 hour and chlorophyll a content ไฟห increased at 72 hour (Figure 3A). In parts of chlorophyll b content in 72 hour was discovered the 1000 ppm concentration chlorophyll b content have been decreased at 24 hour and then increased around 48 hour to 72 hour. The 100 ppm concentration chlorophyll b content was increased between 48 hour and 72 hour (Figure 3B). Lastly, carotenoid content was decreased by effect of 1000 ppm leaf extract around 24 hour to 72 hour. The 100 ppm concentration was decreased in the first 24 hour and then increased after 24 hour but still lower than 0 ppm (Figure 3C).

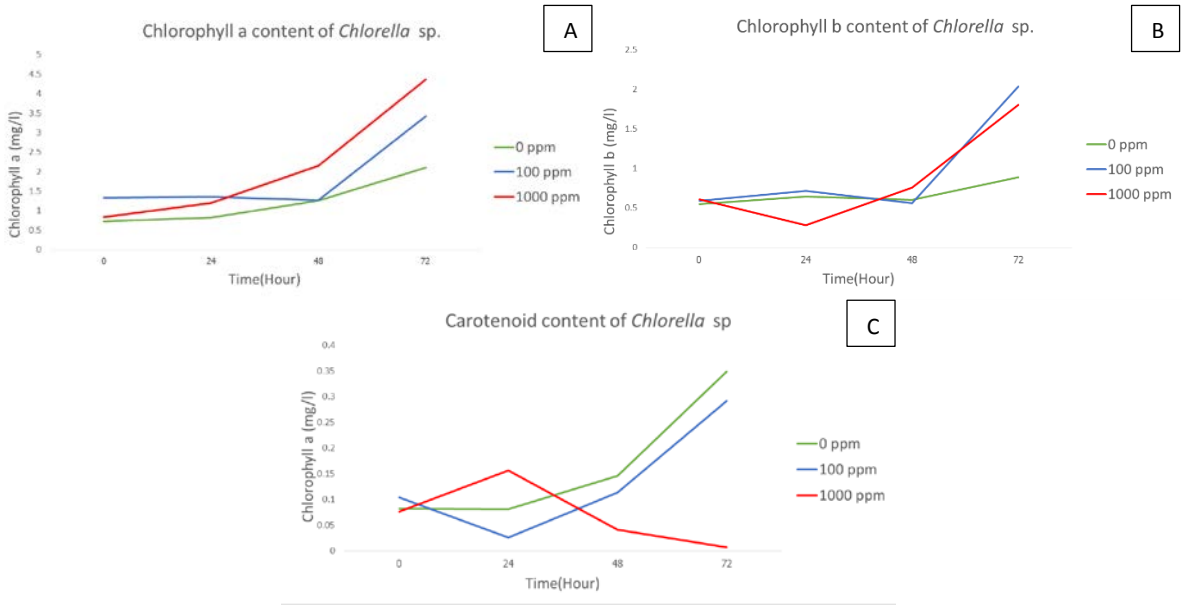


Figure 3 Graph of chlorophyll a (A), chlorophyll b (B) and carotenoid (C) content in 72 hour after treated with leaf extract of *G. lobbianum* at 0 ppm, 100 ppm, 1000 ppm

Effect of stem bark extract to biomass of *Chlorella* sp. in 72 hour

Chlorophyll a content in 72 hour was found, the 1000 ppm concentration has effect decreasing chlorophyll a content throughout 0 hour to 72 hour compared with the 0 ppm concentration. The 100 ppm concentration increase chlorophyll a content around 0 hour to 72 hour (Figure 4A). In parts of chlorophyll b content in 72 hour was discovered the 1000 ppm concentration chlorophyll b content have been decreased throughout 0 hour to 72 hour. The 100 ppm concentration chlorophyll b content have same behavior with the 0 ppm concentration (Figure 4B). Lastly, carotenoid content was decreased by effect of 1000 ppm leaf extract around 0 hour to 48 hour and increased at 72 hour. The 100 ppm concentration have same behavior with the 0 ppm concentration (Figure 4C).

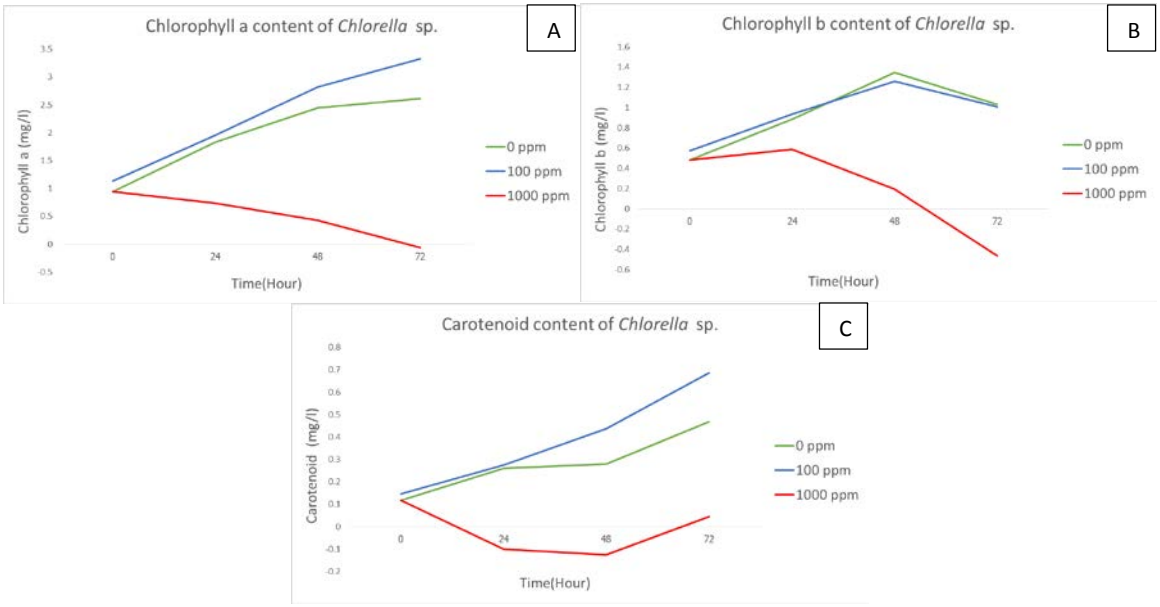


Figure 4 Graph of chlorophyll a (A), chlorophyll b (B) and carotenoid (C) content in 72 hour after treated with bark extract of *G. lobbianum* at 0 ppm, 100 ppm, 1000 ppm

3. Discussion

Since the study of *G. calleryanum* from Philippines (Chan *et al*., 1998), this is the second study that investigated another species of genus *Gonocaryum*. Lipophilic extract of *G. lobbianum* was studied here. The spots of the secondary metabolite from TLC, both of leaf and stem bark extract should be flavonoid, and secoiridoid, because genus *Gonocaryum* have minor compounds, is flavonoid and secoiridoid (Kaneko *et al*., 1995). TLC and HPLC showed two peaks, that can be seen only under wavelength 365 nm from bark extract that have potential to be pure by using other techniques, such as medium pressure liquid chromatography (MPLC). Similarly, leaf extract has the same profile but one spot that have only in leaf extract, can be seen under both wavelength 254 nm and 365 nm. This spot was most likely to purification by using sephadex techniques (Harborne, 1998).

The site of action of lipophilic extract on cell growth and pigments concentration of *Chlorella* sp. were investigated using spectrophotometry. Cell growth was inhibited after 24 h of exposure to 1000 ppm bark extract and the strong inhibitory effect remained until 72 hour but leaf extract didn't show clear effect. Inhibition of cell growth is usually an important index of many herbicides including some phytotoxins (Magnusson *et al*., 2008; Ebenezer and Ki, 2013).

The contents of chlorophyll a and carotenoids were reduced by 1000 ppm bark extract while chlorophyll b was slowly reduced after 48 hour. 1000 ppm leaf extract reduced carotenoids after 48 hour. This implies that carotenoids are more vulnerable to leaf extract toxicity than chlorophyll a and chlorophyll b. Reduction of chlorophyll a and carotenoids well agreed with other studies (Magnusson *et al*., 2008).

The reduction of pigments content was observed most likely due to reduced biomass of *Chlorella* sp. The decrease of chlorophyll a after exposure to bark extract indicates a decrease in the antenna size of photosynthetic reaction center complexes (Björkman, 1981). Carotenoids play an important role in non-photochemical quenching (NPQ) and dissipation of excess energy under high light stress to prevent damage to algae (Müller *et al*., 2001). Decrease of carotenoids content will decrease oxygen evolution (Dankov *et al*., 2009) and reduce the dissipation of harmful excess excitation energy (Müller *et al*., 2001).

CONCLUSION

This report of chemical profiles of leaf and stem bark lipophilic extracts of *G. lobbianum* (Cardiopteraceae), indicated similarity between leaf and stembark extract and potential for antialgal activity. Effective pure compounds should be isolated to obtain alternative chemicals and for chemotaxonomy which can be evidence to support for classification and medicinal plant work. Further studies should be carried out to investigate chemotaxonomy of other species in the genus *Gonocaryum* and also their toxicity.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported from Kasetsart University Research and Development Institute was gratefully acknowledged and graduate scholarship rovided by the National Research Council of Thailand (NRCT) as of fiscal year 2018.

REFERENCES

Chan, Y.Y., Y.L. Leu, F.W. Lin, C.Y. Li, Y.C. Wu and L.S. Shi. 1998. **A Secoiridoid and Other Constituents of *Gonocaryum Calleryanum* Phytochermistry**. 47(6): 1073-1077.

Björkman, O. 1981. Responses to different quantum flux densities, pp. 57–107. *In* O. L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond, H. Ziegler (Eds.), **Physiological Plant Ecology I. Encyclopedia of Plant Physiology**. Springer-Verlag, Berlin.

Dankov, K., M. Busheva, D. Stefanov, E.L. Apostolova. 2009. Relationship between the degree of carotenoid depletion and function of the photosynthetic apparatus, **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**. 96: 49–56.

Deng, C., H. Shao, X. Pan, S. Wang and D. Zhang. 2014. Herbicidal effects of harmaline from *Peganum harmala* on photosynthesis of *Chlorella pyrenoidosa*: Probed by chlorophyll fluorescence and thermoluminescence. **Pesticide Biochemistry and Physiology**. 115: 23–31.

Harborne, J.B. 1993. **Introduction to Ecological Biochemistry. 4th edition**. Academic press limited. London.

Kaneko, T., M. Sakamoto, K. Ohtani, A. Ito, R. Kasai, K. Yamasaki and W.G. Padorina. 1995. Secoiridoid and Flavonoid Glycosides from *Gonocaryum Calleryanum*. **Phytochemistry**. 39(1): 115-120.

Ma, Z., T. Fang, R.W. Thring, Y. Li, H. Yu, Q. Zhou and M. Zhao. 2015. Toxic and non-toxic strains of *Microcystis aeruginosa* induce temperature dependent allelopathy toward growth andphotosynthesis of *Chlorella vulgaris*. **Harmful Algae**. 48: 21–29.

Magnusson, M., K. Heimann, A.P. Negri. 2008. Comparative effects of herbicides on photosynthesis and growth of tropical estuarine microalgae. **Marine Pollution Bulletin** 56: 1545–1552.

Müller, P., X.P. Li, K.K. Niyogi. 2001. Non-photochemical quenching. A response to excess light energy. **Plant Physiology**. 125: 1558–1566.

Okay, O.S. and E. Morkoq, 1994. Effects of Two Herbicidal Wastewaters on *Chlorella* sp. and *Phaeodactylum tricornutum*, **Environmental Pollution**. 84: 1-6.

Quisumbing, E. 1978. **Medicinal Plants of the Philippines**. Katha Philippine.

Safi, C., B. Zebib, O. Merah, P. Pontalier and C. Vaca-Garcia. 2014. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 35: 265–278.

Sikka, H.C, J. Carroll and G. Zweig. 1971. Effect of Certain Quinone Pesticides on Acetate Photometabolism and Dark CO, Fixation in Chlorella. **Pesticide Biochemistry and Physiology**. 1: 381-388.

Sleumer, H. 1970. Icacinaceae, pp. 75-92. *in* T. Smitinand and K. Larsen, eds. **Flora of Thailand. Vol. 2. Part 1.** The Tistr Press Co. Ltd, Bangkok.

Shoaf, T.W. and B.W. Lium. 1976. Improved extraction of chlorophyll a and b from algae using dimethyl sulphoxide. **Limnology and oceanography**. 21: 926–928.

Tantawy, M.M. and L.H. Grimme. 1982. The Bleaching Induced by the Phenylpyridazinone Herbicide Metflurazon in *Chlorella* Is a Metabolic and Reversible Process. **Pesticide Biochemistry and Physiology**. 18: 304-314.

V. Ebenezer, J.S. Ki. 2013. Quantification of toxic effects of the herbicide metolachlor on marine microalgae *Ditylum brightwellii* (Bacillariophyceae), *Prorocentrum minimum* (Dinophyceae) and *Tetraselmis suecica* (Chlorophyceae). **Journal of Microbiology**. 51: 136–139.

Xia-li, Y., Y. Xiao-qing, L. Yong-hong and D. Yuan-yan. 2007. Effect of Bensulfuron-Methyl on Growth of *Chlorella pyrenoidosa*. **Agricultural Sciences in China**. 6(3): 316-321.

Evaluation of the Stability and Sensitivity of Quartz Crystal Nanobalance For Detection of Organic Molecule Adsorption

Naray Pewnim[1*] and Wanatchaporn Arunmanee[2]

ABSTRACT

Quartz crystal micro/nanobalance (QCM/QCN) is a very sensitive instrument used to measure the mass changes that occur when molecules are adsorbed on an electrode surface. Combined with electrochemical techniques, an EQCN has been proven to be useful to study how adsorption and desorption of surface active agents can affect the metal deposition process. In this work, the stability and sensitivity of a custom built QCN cell is evaluated to determine its potential for the detection of organic molecule adsorption. Stability in normal aqueous solutions was achieved in an acceptable timescale while the sensitivity was reliable enough to detect surfactant adsorptions of as low as 10 ng within the active surface area, raising the possibility for biosensor applications.

Keywords: Quartz crystal nanobalance, adsorption, biosensor, surfactant, gold surface

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

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

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

INTRODUCTION

Quartz crystal micro/nanobalance (QCM/QCN) is a highly sensitive instrument used to measure the mass changes on an electrode surface. A QCN can detect mass changes in the range of ng/cm^2 and is sensitive enough to detect atomic monolayers forming at the surface (Handley, 2001). QCN can be applied to study various interfacial processes occurring at or near the electrode surface such as surface adsorption or desorption (Buttery and Ward, 1992).

QCN was traditionally used to monitor the deposition rate and viscoelastic properties of thin film deposits, but recently it has increasingly been used as biosensors due to its high sensitivity and ability to detect reagents in solutions at very low concentrations (Kimmel et al., 2012). For example, a monolayer of antibodies can initially be formed on the electrode surface and antigens which bind to those antibodies can then be introduced into the solution (Bhand and Mishra, 2017). The binding of antigens to antibodies on the surface would result in a mass change that can be monitored by QCN. Another important application can be found in Electrochemical Quartz Crystal Nanobalance (EQCN) where the effect of various electrochemical parameters such as potential, current density, as well as charge consumed can be monitored during metal electrodeposition process (Pewnim and Roy, 2015).

QCM/QCN take advantage of work carried out by Sauerbrey in the late 1950s when it was found that material deposited on a quartz crystal surface caused a change in the crystal's resonance frequency as described by the Sauerbrey equation (Sauerbrey, 1959):

$$-\Delta f = C_f \Delta m / A$$

Where f is the resonant frequency (Hz), C_f is the quartz sensitivity constant (Hz g^{-1} cm^2), m is the mass of the deposit (g), and A is the active surface area (cm^2). As both C_f and A are constants for each specific crystal used, the equation can be reduced to

$$\Delta f = -\alpha \Delta m$$

This means that there is a simple linear relationship where the change in resonant frequency is directly proportional to the change in mass. Material adsorbing at the surface increases the mass and causes the frequency to decrease. On the other hand, material desorbing from the surface decreases the mass and an increase in frequency is observed. The term α can be determined experimentally through calibration experiments. If the density of the deposited material is known, one could also calculate the thickness of the deposited layer as well.

This work aims to evaluate two important qualities, stability and sensitivity, of a custom built QCN cell and to test whether this prototype would be suitable for detecting the adsorption of organic molecules on a gold surface by using the adsorption of a surfactant as an analog.

MATERIALS AND METHODS

1. Quartz crystal analyzer

The Quartz Crystal Analyzer (QCA917; Seiko EG&G) resonance frequency was recorded by connecting the QCA main unit to a computer running QCA917 software, which digitally recorded and stored experimental data for further processing. The QCA main unit was then connected to the actual oscillator unit (resonator). The two pins of the quartz crystal resonator were inserted into this box unit.

2. Quartz crystal resonator

The quartz crystals used are double sided electrodes coated with a thin layer of gold (~300 nm) with an active surface area of 0.196 cm^2 ($\varnothing$ = 0.5 cm) per side. Once assembled only the middle circular region is exposed. Although experiments can be setup where both sides of the crystal are exposed, for this research only one side is exposed to the external media when the crystal is assembled in the quartz crystal holder.

3. Quartz Crystal Nanobalance (QCN) glass cell setup

3.1 Non-electrochemical adsorption experiments (stability measurements)

Figure 1a shows a fully assembled custom made QCN cell with two metal clamps to hold the well cell in place. A rubber O-ring is placed between the flange cup of the crystal holder and the ground glass joint flange of the main glass cell to prevent leakage. It is important that the clamps are properly attached so that they are not clamping near the outer edge of the glass because the pressure would be unevenly distributed which may cause the glass cell to break. The metal clamps can then be moved freely to act as support to further stabilize the whole assembly.

3.2 Electrochemical adsorption experiments (sensitivity measurements)

For EQCN experiments, a Luggin probe which holds the reference electrode can also be attached as seen in Figure 1b. To reduce electrical interference, it is highly recommended that the completed assembly be further housed inside a Faraday cage. An EcoChemie μAutolab II potentiostat running NOVA 1.7 software was used to control and record data.

4. Testing media for stability and sensitivity measurements

Stability of the QCN cell was tested in three types of media with different viscosities namely in air at normal atmospheric pressure, distilled water, and 20 vol.% ethylene glycol solution. Sensitivity of the QCN was carried out using a standard calibration method where copper is electrodeposited on the gold surface of the quartz crystal resonator; a solution of 0.1 M $CuSO_4$ in 0.5 M H_2SO_4 was used for this purpose (Johannsen et al., 2000). A 0.01 vol.% fluorosurfactant (DuPont Zonyl FSN) solution was used to mimic the type of organic adsorption that can form monolayers on the electrode surface.

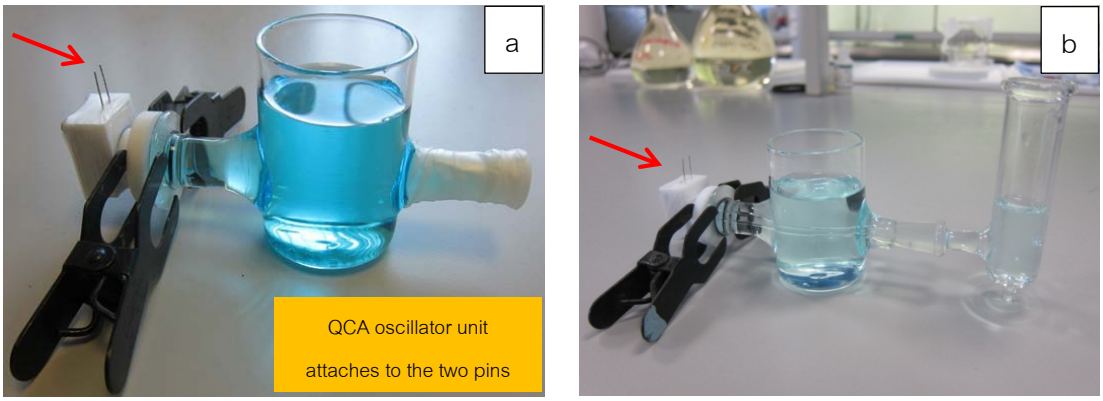


Figure 1 QCN cell setup for a) non-electrochemical experiments with the quartz crystal attached on one end (left) while the port on the right hand side can be closed either with a glass stopper or, in this case, Parafilm and b) electrochemical experiments with Luggin probe that holds the reference electrode attached on the opposite end (right).

RESULTS AND DISCUSSION

1. QCN cell short and long-term stability

The amount of time it takes to achieve a stable resonating frequency is dependent on factors such as the viscosity of solution used and the amount of time needed for a monolayer to form on the gold surface. It can take anywhere from 10 minutes to over two hours for the resonating frequency to stabilize. However, it was found that once the frequency did stabilize, a starting baseline duration of 30-60 s is usually sufficient for reliable measurements. It is recommended that a test run of a few hours be carried out for specific solutions to be used. Table 1 gives an example of typical normal resonance frequency and fluctuations that can be seen from different solutions. As expected, more viscous solutions make it harder for the quartz crystal to vibrate and, therefore, its stable resonance frequency was significantly lower in 20 vol.% ethylene glycol. However, the very large fluctuations compared to normal aqueous solutions was unexpected; a stable baseline was also not observed. This means that solutions would need to be sufficiently diluted for reliable adsorption measurements.

Medium	Resonance Frequency (MHz)	Fluctuations (Hz)	Time to stabilize
Air	8.96	±15	< 5 min.
Water	8.95	±5	10-30 min.
Ethylene Glycol	2.57	±4,000 (0.15%)	> 50 min.

Table 1 Relative time to reach stable normal resonating frequency in various media.

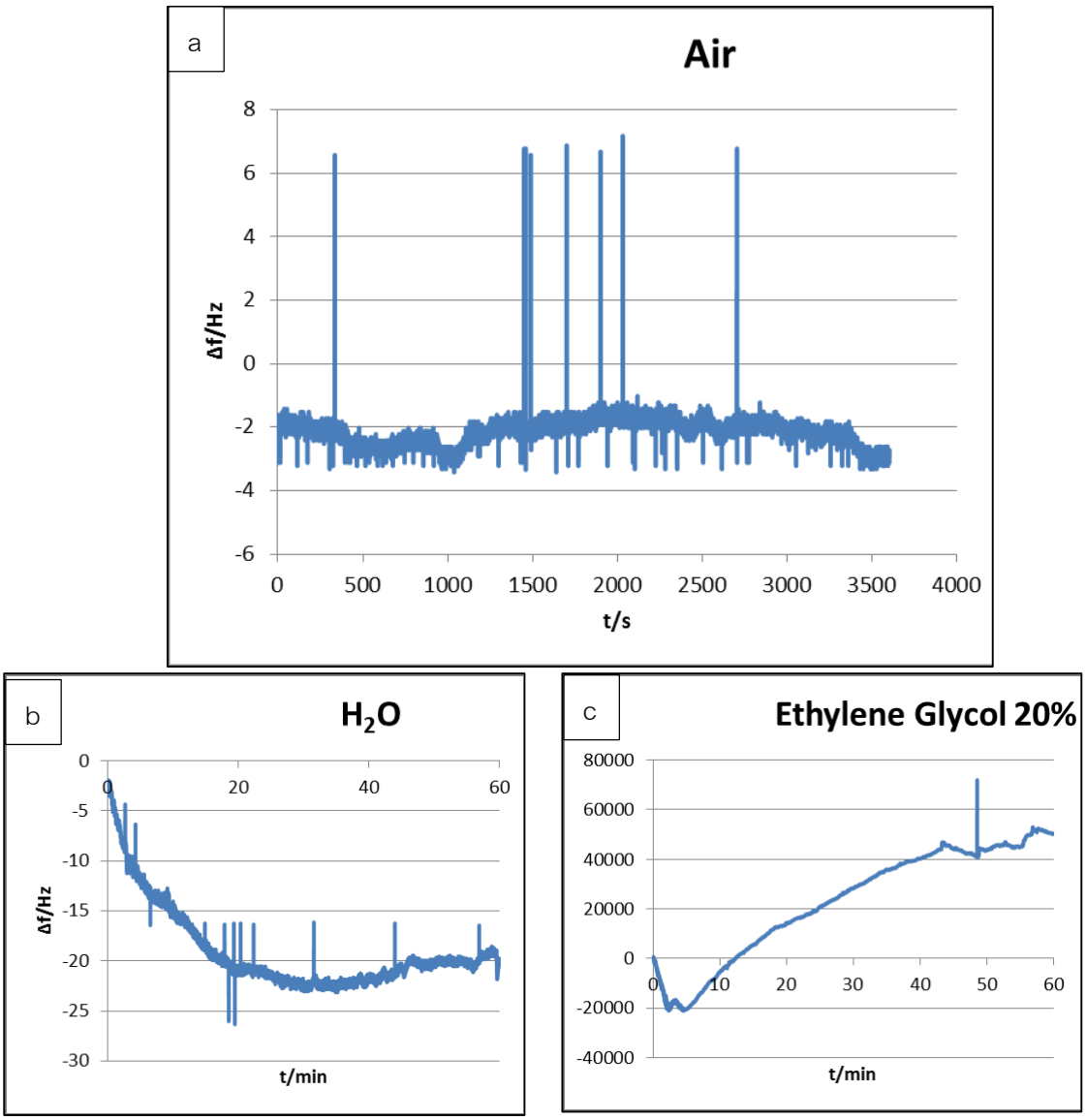


Figure 2 Typical frequency fluctuations while attempting to find a starting baseline in various media. a) air, b) distilled water, and c) 20 vol.% ethylene glycol.

Figure 2 shows typical frequency fluctuations observed in solutions with varying viscosities. Although it takes a relatively short time for the QCN to stabilize in air, one major problem is that slight movements of air can cause short bursts of large fluctuations such as those seen in Fig. 2a. In this case just the opening and closing of laboratory doors can affect the sensitivity of the measurements. Aqueous solutions are stable and therefore more suitable to measure surface deposition. Figure 2c shows that ethylene glycol is not binding to the gold electrode surface and as time passes seems to be removed from the surface altogether (net positive Δf). The fact that viscous solutions such as ethylene glycol take a significantly longer time for the resonating frequency to stabilize (> 50 min.) combined with the relatively large fluctuations (±4,000 Hz) excludes them for use with the QCN.

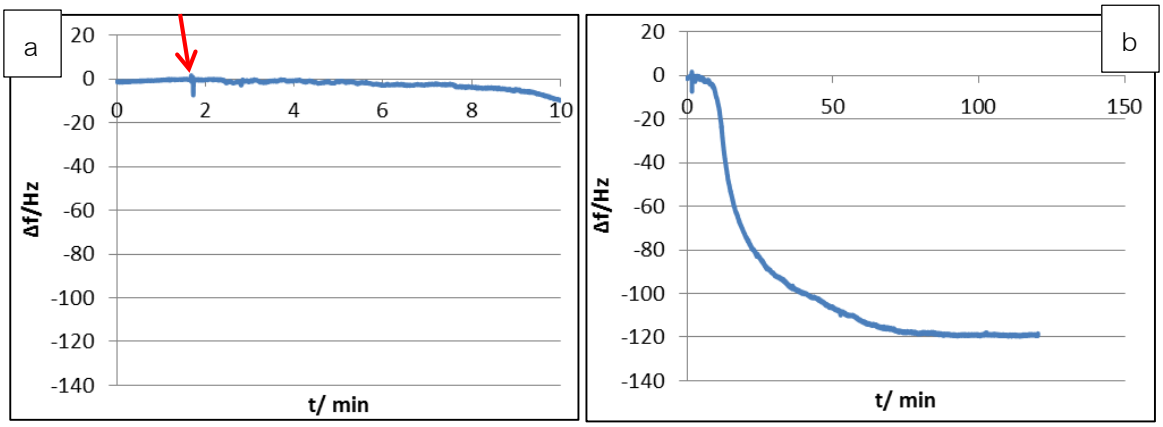


Figure 3 Adsorption of surfactant on gold surface a) short-term within the first 10 min. and b) long-term up to 120 min.

Figure 3 shows the adsorption of surfactant on the gold surface during a 120 min. time scale. The moment a drop of surfactant is dropped into distilled water can be clearly seen as marked by the arrow in Fig. 3a. The surfactant can be seen to then slowly migrate to and reach the gold surface from around the 8 min. mark when the resonance frequency starts to noticeably decrease. It took approximately 60 min. before a new stable resonance frequency was reached (Δf = –120 Hz) which remained stable for the next 60 min beyond that.

2. QCN Sensitivity

Calibration measurements with Cu showed that this QCN cell had a sensitivity factor of 8.14 x 10^{8} Hz g^{-1} with a standard deviation of ±4.12 x 10^{7} Hz g^{-1}. Short term measurements in the first 10 min. showed that surfactant depositions of as little as 10 ng can be reliably detected. As seen in Figure 3b it can then be estimated that a stable layer of about 128 ng of surfactant was eventually deposited on the gold electrode surface.

CONCLUSION

It has been shown that the custom built QCN cell prototype is acceptable for use in aqueous solutions of low viscosity and would, therefore, be suitable for biosensor applications. A stable baseline for measurements can be obtain in less than 5 minutes and once a stable adsorption layer, in this case a surfactant, was established on the gold surface it remained stable for a significant amount of time beyond 120 min.

ACKNOWLEDGEMENTS

Technical and equipment support from Newcastle University was greatly appreciated.

REFERENCES

Bhand S. and G.K. Mishra. 2017. Electrochemical Quartz Crystal Nanobalance (EQCN) Based Biosensor for Sensitive Detection of Antibiotic Residues in Milk. **Methods in Molecular Biology**. 1572:263-276

Buttry D. A. and M. Ward.1992. Measurements of Interfacial Processes at electrode Surfaces with the Electrochemical Quartz Crystal Microbalance. **Chemical Reviews**. 92: 1355-1379.

Handley, J. 2001. Quartz Crystal Microbalances. **Analytical Chemistry**. 73: 225A-229A

Johannsen, K., D. Page and S. Roy. 2000. A systematic investigation of current efficiency during brass deposition from a pyrophosphate electrolyte using RDE, RCE, and QCM. **Electrochimica Acta**. 45: 3691-3702

Kimmel D. W., G. LeBlanc, M. E. Meschievitz and D. E. Cliffel. 2012. Electrochemical Sensors and Biosensors. **Analytical Chemistry**. 84: 685-707.

Pewnim, N and S.Roy. 2015. Effect of Fluorosurfactant Additive during Cu-Sn Codeposition from Methanesulfonic Acid. **Journal of the Electrochemical Society**. 162: D360-D364.

Sauerbrey G. 1959. The use of quartz oscillators for weighing thin layers and for microweighing. **Zeitschrift für Physik**. 155: 206-222.

ผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันต่อการงอกเมล็ดและการเจริญเติบโตของต้นกล้าไมยราบยักษ์

Effect of Sunflower Pericarp Aqueous Extract on *Mimosa pigra* L.

ณัฐพล สุนทรโชติ[1] อรอุษา คำสุข[1] และ ศรีสม สุวรรณวงศ์[1]*

Nattapon Sunthonchote[1], Ornusa Khamsuk[1] and Srisom Suwanwong[1]*

บทคัดย่อ

เพื่อศึกษาผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันต่อการงอกของเมล็ดและการเจริญเติบโตของต้นกล้าไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) และศึกษากลไกการทำลายของสารสกัด จึงเพาะเมล็ดไมยราบยักษ์โดยให้สารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันที่สกัดด้วยน้ำความเข้มข้น 10, 20 และ 30% (w/v) เป็นเวลา 5 วัน โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) พบว่าสารสกัดไม่มีผลยับยั้งการงอก แต่มีผลชะลอการงอกของเมล็ด และทำให้ความยาวรากของต้นกล้าไมยราบยักษ์มีค่าเท่ากับ 3.26, 2.32 และ 1.56 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ใช้น้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม) และจากการศึกษากลไกการทำลายของสารสกัดโดยมีพืชทดสอบคือ ไมยราบยักษ์ พบว่าสารสกัดทำให้เกิดกระบวนการ lipid peroxidation ในต้นกล้าไมยราบยักษ์ เมื่อนำพืชทดสอบมาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) พบว่าสารสกัดทำให้ปลายรากบวมพอง เซลล์เนื้อเยื่อชั้นผิวปลายรากหลุดลอก และทำลายเซลล์หมวกรากซึ่งแตกต่างจากชุดควบคุม

ABSTRACT

To study the effects of sunflower pericarp aqueous extract on seed germination, seedling growth of *Mimosa pigra* L. and mode of action of the extract, *Mimosa pigra* L. seed is treated with the 10, 20 and 30% (w/v) of the extract for 5 days. That analyzed by Completely Randomized Design (CRD). The results showed that the extract didn't inhibit seed germination but delayed germination and inhibited seedling growth, especially root growth of *Mimosa pigra* L.. Root length were 3.26, 2.32 and 1.56 centimeter, which were significantly different from the control (used distilled water as control). Mode of action of the extract was examined using *Mimosa pigra* L. as the tested plant. The result showed that the extract induced lipid peroxidation in *Mimosa pigra* L. seedling. The ultrastructural changes were determined by Scanning Electron Microscope (SEM). The result showed swollen root tip, epidermis peeled off and damaged root cap cells.

Key word: sunflower pericarp, aqueous extract, *Mimosa pigra* L.

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

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

คำนำ

วัชพืชเป็นหนึ่งในปัญหาที่สำคัญในการทำเกษตรกรรม เนื่องจากเป็นตัวแก่งแย่งปัจจัยต่างๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชปลูก ทำให้พืชปลูกมีการเจริญเติบโตช้า รวมทั้งผลผลิตทางการเกษตรลดลง การกำจัดวัชพืชจึงเป็นสิ่งจำเป็น เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมกำจัดวัชพืชด้วยสารเคมีสังเคราะห์เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูง และเห็นผลฉับพลัน อย่างไรก็ตามการกำจัดวัชพืชด้วยสารเคมีสังเคราะห์มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลายด้าน ทั้งการตกค้างในดิน แหล่งน้ำ ผลผลิต ร่างกายของผู้ใช้และผู้บริโภค ปัจจุบันมีการนำสาร allelochemicals ที่ได้จากพืชและ จุลินทรีย์ มาผลิตเป็นสารกำจัดวัชพืชชีวภาพ ซึ่งสามารถควบคุมและยับยั้งการเจริญเติบโตของวัชพืชได้โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพียงเล็กน้อย สาร allelochemicals นี้เป็นสารที่ได้จากกระบวนการ secondary metabolite ของพืชและจุลินทรีย์ (Anjum *et al.,* 2005) และในธรรมชาติทานตะวันเป็นพืชที่ปลดปล่อยสาร allelochemicals สู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลทำให้การเจริญเติบโตของพืชบางชนิดลดลง มีการนำสาร allelochemicals จากส่วนต่างๆ ของทานตะวันมาทดสอบต่อการงอกของเมล็ดและการเจริญเติบโตของต้นกล้าของพืชอื่น ผลคือ มีการยับยั้งการงอกของเมล็ดและการเจริญเติบโตของต้นกกล้าของพืชชนิดอื่น (Muhammad and Majeed, 2014) แต่ทั้งนี้ยังไม่พบว่ามีผู้ใดนำเปลือกผลทานตะวันมาทำการสกัดและทดสอบในการควบคุมวัชพืช

ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันที่สกัดด้วยน้ำ ต่อการงอกเมล็ดและการเจริญเติบโตของต้นกล้าไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) ซึ่งเป็นวัชพืชต่างถิ่นรุกราน และศึกษากลไกการทำลายของสารสกัดโดยมีพืชทดสอบคือ ไมยราบยักษ์

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การสกัดสาร allelochemical จากเปลือกผลทานตะวัน

เตรียมสารสกัดความเข้มข้น 10, 20 และ 30% (w/v) โดยแช่เปลือกผลทานตะวันที่บดละเอียดน้ำหนัก 10, 20, และ 30 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองด้วยผ้าขาวบางและกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 นำสารสกัดที่ได้ไปทำการทดสอบต่อไป

2. การทดสอบผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันต่อการงอกของเมล็ดและการเจริญเติบโตของต้นกล้าไมยราบยักษ์

เพาะเมล็ดไมยราบยักษ์บนกระดาษเพาะ ที่มีสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวัน ความเข้มข้น 10, 20, และ 30% (w/v) ที่อุณหภูมิห้อง ทุก 24 ชั่วโมงนับจำนวนเมล็ดไมยราบยักษ์ที่มีรากแรกเกิด (radicle) ยาวมากกว่า 2 มิลลิเมตร (จวงจันทร์, 2529) ทุกวันเป็นเวลา 5 วัน วัดความยาวยอดและความยาวรากของต้นกล้าไมยราบยักษ์หลังเพาะเมล็ดเป็นเวลา 5 วัน

3. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content)

นำสารสกัดความเข้มข้น 10, 20, และ 30% (w/v) จากนั้นปิเปตต์สารละลายตัวอย่างปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร เติมสารละลาย Folin – Ciocateau's reagent ที่เจือจาง 10 เท่า ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร นำไปแช่ใน waterbath ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ทำการทดลองสิ่งละ 5 ซ้ำ (Javanmardi *et al.,* 2003)

4. ศึกษาผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อการกิด lipid peroxidation ในต้นกล้าไมยราบยักษ์

ศึกษาผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันต่อการเกิด lipid peroxidation โดยเพาะเมล็ดพืชทดสอบบนกระดาษเพาะ ที่มีสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันที่ความเข้มข้น 10, 20, และ 30% (w/v) แล้ววิเคราะห์การเกิด lipid peroxidation ในต้นกล้าไมยราบยักษ์ หลังเพาะเป็นเวลา 5 วัน โดยแยกวิเคราะห์ส่วนยอดและส่วนรากของพืช ทำการทดสอบการเกิด lipid peroxidation โดยวัดปริมาณ malondialdihyde (MDA) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดการเกิด lipid peroxidation โดยดัดแปลงจากวิธีของ Velikova *et al.* (2000)

5. ศึกษาการทำลายของสารสกัดที่ปลายรากไมยราบย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

เพาะเมล็ดไมยราบยักษ์โดยให้สารสกัดความเข้มข้น 0 และ 30% (w/v) เมื่อครบ 5 วัน ตัดปลายรากยาว 0.3 เซนติเมตร dehydration ด้วยแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 15, 30, 60, 95 และ 100% (w/v) ความเข้มข้นละ 15 นาที ตามลำดับ ทำตัวอย่างให้แห้งด้วยเครื่อง critical point drier จากนั้นนำตัวอย่างมาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลอง

1. ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

สารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้น 10, 20, และ 30% (w/v) มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 75.00, 118.57 และ 154.29 ppm ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ตารางที่ 1)

2. ผลการทดสอบผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันต่อการงอกของเมล็ดและการเจริญเติบโตของต้นกล้าไมยราบยักษ์

2.1) ผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันต่องอกของเมล็ดไมยราบยักษ์

สารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้น 10, 20, และ 30% (w/v) ไม่มีผลยับยั้งการงอก แต่มีผลชะลอการงอกของเมล็ดไมยราบยักษ์ (ตารางที่ 2 และ 3)

2.2) ผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าไมยราบยักษ์

สารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้น 10, 20, และ 30% (w/v) ทำให้ต้นกล้าไมยราบยักษ์มีความยาวรากเฉลี่ยเท่ากับ 3.26, 2.32, และ 1.56 เซนติเมตร ตามลำดับ และที่ความเข้มข้น 30% (w/v) ทำให้ความยาวยอดเฉลี่ยเท่ากับ 2.68 เซนติเมตร ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 1และตารางที่ 2)

3. ผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันต่อการเกิด lipid peroxidation ในต้นกล้าไมยราบยักษ์

สารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30% (w/v) ทำให้ปริมาณ MDA ในยอดและรากมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.43, 11.80, 12.46, 13.09 และ 6.98, 12.50, 18.59, 13.52 นาโนโมลต่อกรัมน้ำหนักสด ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ตารางที่ 4)

4. ผลการทำลายของสารสกัดที่ปลายรากไมยราบยักษ์ ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้น 30% (w/v) ทำให้ปลายรากไมยราบยักษ์บวมพอง เซลล์เนื้อเยื่อชั้นผิวปลายรากหลุดลอก และเซลล์หมวกรากถูกทำลาย เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 2)

ตารางที่ 1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวัน

ความเข้มข้นสารสกัด (% w/v)	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (ppm)
10	75.00 ± 1.17 c
20	118.57 ± 5.92 b
30	154.29 ± 2.05 a

ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ วิเคราะห์ด้วยวิธี DMRT.

ตารางที่ 2 ผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวัน ต่อการงอกของเมล็ดและการเจริญเติบโตของต้นกล้าไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.)

ความเข้มข้นสารสกัด (% w/v)	การงอกของเมล็ด (% of control)	ความยาวยอด (cm)	ความยาวราก (cm)
0	100 ± 6.32 [ns]	2.94 ± 0.64 b	3.47 ± 0.98 d
10	103.64 ± 9.86	3.07 ± 0.57 b	3.26 ± 0.87 c
20	104.55 ± 7.88	2.95 ± 0.51 b	2.32 ± 0.53 b
30	104.54 ± 0	2.68 ± 0.36 a	1.56 ± 0.35 a

ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ วิเคราะห์ด้วยวิธี DMRT, ns = ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 3 ผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวัน ต่อการชะลอการงอกของเมล็ดไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.)

ความเข้มข้นสารสกัด (% w/v)	การงอกของเมล็ด (% of control)		
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3
0	100 ± 6.57 d	100 ± 6.32 b	100 ± 6.32 [ns]
10	83.52 ± 9.83 c	103.64 ± 9.86 b	103.64 ± 9.86
20	13.19 ± 9.98 b	88.18 ± 13.86 b	104.55 ± 7.88
30	0 ± 0 a	56.06 ± 15.96 a	104.54 ± 0

ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ วิเคราะห์ด้วยวิธี DMRT, ns = ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

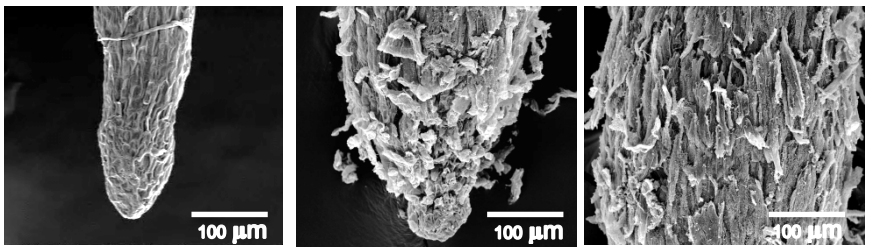
0 10 20 30% (w/v)

ภาพที่ 1 ผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้น 10, 20 และ 30% (w/v) ต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าไมยราบยักษ์

ตารางที่ 4 ผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้น 10, 20 และ 30% (w/v) ต่อปริมาณ MDA ในต้นกล้าไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.)

ความเข้มข้นสารสกัด	ปริมาณ MDA (นาโนโมลต่อกรัมน้ำหนักสด)	
(% w/v)	ยอด	ราก
0	9.43 ± 0.58 b	6.98 ± 0.76 c
10	11.80 ± 1.18 a	12.50 ± 1.22 b
20	12.46 ± 1.56 a	18.59 ± 2.52 a
30	13.09 ± 1.81 a	13.52 ± 0.89 b

ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ วิเคราะห์ด้วยวิธี DMRT



0% (w/v) 30% (w/v)

ภาพที่ 2 ผลของสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้น 0 และ 30%(w/v) ต่อปลายรากไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า สารสกัดไม่มีผลต่อการงอกของเมล็ด แต่มีผลชะลอการงอกของเมล็ด และทำให้ความยาวรากของต้นกล้าไมยราบยักษ์ลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองของ Kupidlowska *et al.* (2006) พบว่าสารสกัดจากใบทานตะวันที่สกัดด้วยน้ำมีผลยับยั้งการงอกของเมล็ด *Sinapis alba* L. ซึ่งสารสกัดทำให้การสลายอาหารสะสมหยุดหรือลดลง และ จากการทดลองของ Muhammad and Majeed. (2014) ที่พบว่าสารสกัดจากทานตะวันในส่วนของ ราก ปลายยอด และใบที่สกัดด้วยน้ำ มีผลยับยั้งการงอกของเมล็ด การเจริญเติบโตและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าข้าวสาลีและข้าวโพด

สารสกัดมีผลต่อการเกิด lipid peroxidation ทั้งในยอดและรากเนื่องจากปริมาณ MDA แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดควบคุม การเกิด lipid peroxidation แสดงถึงการเกิด oxidative stress ดังนั้น การที่สารสกัดทำให้ความยาวยอดและรากของต้นกล้าไมยราบยักษ์ลดลง อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก oxidative stress ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองของ Oracz *et al.* (2007) ที่พบว่า สารสกัดจากใบทานตะวันที่สกัดด้วยน้ำทำให้เกิด oxidative stress ในเมล็ด *Sinapis alba* L. cv. Nakielska ที่กำลังงอก และ Bogatek *et al*. (2006) ที่พบว่า สารสกัดจากใบทานตะวันที่สกัดด้วยน้ำ ทำให้เกิด oxidative stress ในต้นกล้า *Sinapis alba* L.

สารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปลายรากบวมพองและทำลายเซลล์หมวกรากไมยราบยักษ์ ซึ่งคล้ายกับการทดลองของ เพชรพรรณ (2560) ที่พบว่าสารสกัดจากธูปฤาษี (*Typha angustifolia* L.) ที่สกัดด้วยน้ำทำให้ปลายรากไมยราบยักษ์บวมพองและทำลายเซลล์หมวกกราก และทำให้เกิดการหลุดลอกของเนื้อเยื่อชั้นผิวปลายราก Yang *et al.* (2011) พบว่าสารสกัดจากใบและยอดของ *Ageratina adenophora* ที่สกัดด้วยน้ำทำให้ปลายรากของ *Oryza sativa* หลุดลอก Sukkhaeng *et al.* (2015) พบว่าสารสกัดจาก *Nostoc* sp. ที่สกัดด้วยเอทานอล 80 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อเยื่อชั้นผิวปลายรากไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) หลุดลอก และทำลายเซลล์ปลายราก

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในสารสกัดจากเปลือกผลทานตะวันความเข้มข้นต่างๆ พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัดที่เพิ่มขึ้น จึงอาจเป็นไปได้ว่าการชะลอการงอกของเมล็ด และยับยั้งความยาวราก และการเกิด lipid peroxidation เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกที่มีในสารสกัด ซึ่งสอดคล้องกับที่ Li *et al*. (2010) รายงานว่าสารประกอบฟีนอลิกสามารถยับยั้งการแบ่งเซลล์และการยืดยาวของเซลล์ และทำให้เกิด lipid peroxidation

เอกสารอ้างอิง

จวงจันทร์ ดวงพัตรา. 2529. **การตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพเมล็ดพันธุ์**. โรงพิมพ์ทั่งฮั่วซิน, กรุงเทพฯ.

เพชรพรรณ. 2560. **กลไกการทำลายของสารสกัดจากฐูปฤาษีในไมยราบยักษ์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Anjum, T., P. Stevenson, D. Hall and R. Bajwa. 2005. **Allelopathic potential of *Helianthus annuus* L. (sunflower) as nuteral herbicide**. Available Source: https://goo.gl/BrNRrv, Novenber 13, 2017.

Bogatek, R., A. Gniazdowska, W. Zakrzewska, K. Oracz and S.W. Gawronski. 2006. Allelopathic effects of sunflower extracts on mustard seed germination and seedling growth. **Biologia Plantarum**. 50(1): 156-158.

Javanmardi, J., C. Stushnoff, E. Lock and J.M. Vivanco. 2003. Antioxidant activity and total phenolic content of Iranian *Ocimum accessions*. **Food Chemistry**. 83: 547–550.

Kupidlowska, E., A. Gniazdowska, J. Stepien, F. Corbineau and R. Bogatek. 2006. Impact of sunflower (*Helianthus annuus* L.) extract upon reserve mobilization and energy metabolism in germinating mustard (*Sinapis alba* L.) seed. Journal of **Chemical Ecology**. 32: 2569-2583.

Li, Z.H., Q. Wang, X. Ruan, C.D. Pan and D.A. Jiang. 2010. Phenolic and plant allelopathy. **Molecules**. 15: 8933-8952.

Muhammad, Z. and A. Majeed. 2014. Allelopathic effects of aqueous extracts of sunflower on wheat (*Triticum aestivum* L.) and Maize (*Zea mays* L.). **Pakistan Journal Of Botany**. 46(5): 1715-1718.

Orcaz, K., C. Bailly, A. Gniazadowska, D. Come, F. Corbineau and R. Bogatek. 2007. Induction of oxidative stress by sunflower phytotoxins in germinating mustard seed. Journal of **Chemical Ecology**. 33: 251-264.

Sukkhaeng, S., N. Sanevas and S. Suwanwong. 2015. *Nostoc* sp. extract induces oxidative stress-mediated root cell destruction in *Mimosa pigra* L.. **Botanical Studies**. 56: 3.

Velikova, V., I. Yordanov and A. Edreva. 2000. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants protective role of exogenous polyamines. **Plant Science**. 151: 59-66.

Yang, G.Q., F.H. Wan, J.Y. Guo and W.X. Liu. 2011. Cellular and ultrastructural changes in the seedling roots of upland rice (*Oryza sativa*) under the stress of two allelochemicals from *Agertina adenophora*. **Weed Biology and Management**. 11: 152-159.

สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม

Subject: Science and Genetic Engineering

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

Nitrate, Cadmium and Lead Content in Some Fresh Vegetables

Siriwan Soiklom[1*], Wipada Siri-anusornsak [1]and Krittaya Petchpoung[1]

ABSTRACT

Quantification of nitrate, cadmium and lead in 15 types of vegetables namely amaranth, red amaranth, celery, Chinese celery, lemon basil, lasia, melinjo, pak-wan, rice paddy herb, river spiderwort, spinach, vegetable fern, Vietnamese coriander, watercress, white mugwort from local market in Bangkok were analyzed. The results showed all studied vegetables contain nitrate, however none of them exceeded the maximum allowable limit of the European Communities and China. Seven of the studied vegetables contain cadmium more than the maximum limited value, especially, celery that contains cadmium more than 10 times of the limited value. Lead could be detected only in half of studied vegetables. Two of them have higher lead than the maximum allowable limited value. Among these, river spiderwort content exceed the maximum limited value of both cadmium and lead.

Key Words: Nitrate, Cadmium, Lead, Vegetable

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

[1]Scientific Equipment and Research Division, Kasetsart University Research and Development Institute, Kasetsart University

INTRODUCTION

Nowadays, consumers concern more about health, especially food and nutrition. Decision of consume or purchase of some food depends on nutrition value and safety. One of the healthiest food is vegetable due to ubiquitous and universal selling. Although vegetables are low calories, cholesterol and fat but they are also at risk since there are concerning of certain contamination such as heavy metals as reported in many articles (Göthberg, *et al*., 2002 and Kim, *et al*., 2002). One of the most concerning heavy metal contamination is lead. Lead poisoning is the peripheral nerve and chronic kidney disease. Lead is also classified as a 2B carcinogen by IARC. The other concerning heavy metal is cadmium. Nephrotoxicity and cancer are linked to cadmium. The well-known syndrome due to cadmium is Itai-Itai which is related with calcium loss and bone pain. The further concerning is nitrate contamination. The extensive using of chemical fertilizer can cause highly nitrate contamination. Ingested nitrate is reduced to nitrite, which reacts with the amine to form nitrosamines, the carcinogen. These compounds associate with liver, renal, esophagus, and stomach cancer (Klaassen, 2001). Moreover, nitrosamines could disrupt function of thyroid and reproductive hormones (Somade, 2016).

Therefore, this research aimed to study cadmium and lead contamination and nitrate levels in some vegetables in order to obtain safety information of consumption.

MATERIALS AND METHODS

Sample collection and preparation

Fifteen vegetables including amaranth (*Amaranthus viridis*), red amaranth (*Amaranthus tricolor*), celery (*Apium graveolens var. dulce*), Chinese celery (*Apium graveolens var. secalinu*) , lemon basil (*Ocimum citriodorum*), lasia (*Lasia spinosa*), melinjo (*Gnetum gnemon*), pak-wan (*Melientha suavis*), rice paddy herb (*Limnophila aromatica*), river spiderwort (Tradescantia fluminensis), spinach (*Spinacia oleracea*), vegetable fern (*Diplazium esculentum*), Vietnamese coriander (*Persicaria odorata*), watercress (*Nasturtium officinale*), white mugwort (*Artemisia lactiflora*) were purchased from local market in Bangkok Metropolitan Region. The edible part of fresh vegetable samples were washed and oven dried at 50 ^{o}C for 3 days until dry. The dried samples were ground and kept in desiccator until analysis.

Salicylic method for nitrate analysis (Cataldo *et al*., 1975)

A one hundred milligram of samples were extracted by mixing with 10 mL of water for 12 hours. The extract were centrifuged at 2,000 RPM for 10 minutes and filtered through 0.45 micron membrane filter. Two hundred microliters of 5% salicylic acid in conc. H_2SO_4 was added in to 200 µl of the extracted sample and waited for 20 minutes then 5 mL of 2M NaOH was added. The absorbance of reaction

mixture was measured at 410 nm with spectrophotometer. The nitrate concentration was reported in the unit of nitrate (mg NO_3/ kg FW). The analysis was repeated 3 times.

Cadmium and lead analysis (AOAC, 1990)

Five hundred milligrams of sample was digested by adding HNO_3:$HClO_4$ (2:1) and heated at 180^{o}C until the mixture was clear. The digested solution was filtered through Whatman#5 and adjusted volume to 50 mL. Cadmium and lead content was analyzed by atomic absorption graphite furnace (Avanta, GBC). These heavy metal content was reported in the unit of mg/kg dry weight. The analysis was repeated 3 times.

RESULTS AND DISCUSSION

Nitrate content

The level of nitrate in samples was in range of 29 – 2,164 mg/kg FW as shown in Table 1. Vietnamese coriander has lowest nitrate content, while both varieties of celery contain high nitrate concentration with above 2,000 mg/kg FW.

Table 1 Nitrate concentration (mg NO_3/kg Fw) in Fresh Vegetables

Sample	NO_3 ± S.D. (mg NO_3/ kg FW)
Vietnamese coriander	28.7 ± 1.9
Vegetable Fern	65.5 ± 5.0
White mugwort	116.3 ± 4.6
Lasia	140.6 ± 4.2
Rice Paddy Herb	144.4 ± 2.7
Melinjo	162.2 ± 2.5
Pak-wan	168.1 ± 3.8
Red Amaranth	217.5 ± 2.9
Lemon Basil	311.1 ± 2.1
Watercress	529.9 ± 4.5
Amaranth	559.2 ± 3.7
Spinach	588.9 ± 5.4
River Spiderwort	1230.7 ± 3.7
Chinese Celery	2114.9 ± 7.8
Celery	2164.2 ± 77

Therefore, nitrate in celery is higher than Vietnamese coriander almost 100 times. Although, Thailand has no regulation for nitrate in vegetables, nitrate standard in China and Europe have been

established. In China, a suggested maximum concentration in vegetables is 3,100 mg/kg FW. In the European Communities, maximum level of nitrate in spinach is 2,500 mg/kg FW and that of celery is 4,000 mg/kg FW (Santamaria, 2006). For this reason, all studied sample is considered safe. However, according to amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for nitrates in foodstuffs, nitrate in food for baby and young children will not exceed 200 mg/kg FW. Thereby, usage of high nitrate content vegetable for children should be reconsider.

Cadmium and lead content

The result form atomic absorption graphite furnace presented that all of 15 vegetables contain cadmium from 0.053-2.364 mg/kg. In according to Codex, the maximum level of cadmium in vegetable is 0.2 mg/kg (The National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2006).

Table 2 Cadmium concentration (mg/kg) in various Fresh Vegetables

Sample	Cd ± S.D. (mg/kg)
Lemon Basil	0.053 ± 0.007
Watercress	0.091 ± 0.009
Melinjo	0.093 ± 0.015
Vietnamese Coriander	0.108 ± 0.009
Vegetable Fern	0.129 ± 0.010
Amaranth	0.142 ± 0.013
Rice Paddy Herb	0.185 ± 0.019
White mugwort	0.198 ± 0.020
Spinach	0.204 ± 0.048
Red Amaranth	0.218 ± 0.013
River Spiderwort	0.413 ± 0.019
Pak-wan	0.645 ± 0.125
Chinese celery	0.769± 0.034
Lasia	1.838 ± 0.157
Celery	2.364 ± 0.070

Therefore, almost half of studied vegetable contain above maximum limit of cadmium, especially celery which has 2.364 mg cadmium/kg, as reported in Table 2.

For lead contamination, there was no lead found in 8 of 15 vegetables including, amaranth, red amaranth, Chinese celery, pak-wan, vegetable fern, Vietnamese coriander, watercress, white mugwort

(Table 3). Lead was found in celery, lasia, melinjo, rice paddy herb, spinach, lemon basil and river spiderwort. Among these vegetable, lemon basil and river spiderwort contain lead more than allowable maximum level (1 mg/kg) as announce by Ministry of Public Health, B.E. 2529 (Ministry of Public Health, 1986). Therefore, river spiderwort contain exceed maximum limit of both cadmium and lead. Furthermore, this vegetable accumulate lead more than 5 times of maximum level.

Table 3 Lead concentration (mg/kg) in various Fresh Vegetables

Sample	Pb ± S.D. (mg/kg)
Amaranth	ND
Red Amaranth	ND
Chinese celery	ND
Pak-wan	ND
Vegetable Fern	ND
Vietnamese Coriander	ND
Watercress	ND
White mugwort	ND
Lasia	0.045 ± 0.004
Melinjo	0.050 ± 0.005
Celery	0.366 ± 0.065
Spinach	0.407 ± 0.008
Rice Paddy Herb	0.98 ± 0.253
Lemon Basil	1.559 ± 0.136
River Spiderwort	5.981 ± 0.460

CONCLUSION

All studied vegetable contain nitrate, however none of them exceed the allowable maximum limit of the European Communities and China. Nevertheless, 8 of them have exceed limit of nitrate for baby and young children food. Therefore, all studied sample is considered safe for adult. However, there is some considering of using high nitrate vegetable for baby and young children.

Similar to nitrate, all studied vegetable contain cadmium. Seven of them have cadmium more than maximum limit, especially, celery that contain cadmium more than 10 times of the limit. In contrast, lead could be detected only in half of studied vegetable. Two of them have higher lead than maximum allowable limit. Among these, river spiderwort contain exceed maximum limit of both cadmium and lead.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Scientific Equipment and Research Division, KURDI, Kasetsart University for supporting this study.

REFERENCES

AOAC .1990. **AOAC Official Methods of Analysis**. 15th Edition, Association of Official Analytical Chemists, Arlington.

Cataldo,D.A., M. Haroon, L.E. Schrader, and V.L. Youngs.1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by salicylic method. **Soil science and plant analysis**. 6(1).71-80.

Göthberg, A., M. Greger, and B.E. Bengtsson. 2002. Accumulation of heavy metals in water spinach (Ipomoea aquatica) cultivated in the Bangkok region, Thailand. **Environmental Toxicology and chemistry**. 21(9): 1934-1939.

Kim, J.Y, K.W. Kim, J.U. Lee, J.S. Lee and J. Cook. 2002. Assessment of As and heavy metal contamination in the Vicinity of Duckum Au-Ag mine, Korea. **Environmental Geochemistry and Health**. 24: 215–227.

Klaassen, C.D. 2001. Casarett and Doull's Toxicology. In **"The basic science of poisons"** Sixth ed. McGraw-Hill.

Ministry of Public Health, 1986. Notification of the Ministry of Public Health No. 98 (B.E. 2529) Re: Prescribing standards of Contaminated Substances. **Announce in the Government gazette, Special Issue**. 103(23): 16-17.

Santamaria, P. 2006. Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 86: 10-17.

Somade, O.T., R.N. Ugbaja, O.E. Adeyi and D.M. Ogunberu. 2016. Thyroid and reproductive hormones disruption as well as kallikrein-3 level in dimethyl nitrosamine-induced toxicity: Effects of ascorbate treatment in male wistar rats. **Biochimie Open**. : 40-46.

The National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2006. Safety requirements for agricultural commodity and food. In **"Thai Agricultural Commodity and Food Standard TACFS 9007-2005"** (in Thai). 19.

Isolation and identification of marine yeasts antagonize *Vibrio parahaemolyticus* causing acute hepatopancreatic necrosis disease

Chakhriya Chalad[1], Varaporn Vuddhakul[1*] and John Mekalanos[2]

ABSTRACT

Vibrio parahaemolyticus (Vp) is a causative agent of acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) which is an emergent shrimp disease resulting in substantial economic loss since 2009. In this work, a total of 66 natural shrimp samples from a Yor island and retail markets in Songkhla province, southern Thailand, were collected and marine yeasts that inhibit *V. parahaemolyticus* causing AHPND (AHPND Vp) were isolated using modified agar well technique. Thirteen of 232 yeast isolates exhibited high inhibitory activity toward AHPND Vp with the inhibition zone between 15.1 and 20.3 mm. They were identified by polymerase chain reaction (PCR) targeted to the internal transcribed spacer (ITS) region and confirmed by sequencing. The potential yeast were identified as genera *Trichosporon*, *Candida*, *Saccharomyces* and *Yarrowia* with 97-100% homology to the GenBank sequences. These marine yeast isolates can be used as potential agents to control AHPND Vp in shrimp culture.

Keywords: acute hepatopancreatic necrosis disease, *Vibrio parahaemolyticus*, yeast.

* Corresponding author; e-mail address: **varaporn.v@psu.ac.th**

[1] Department of Microbiology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Thailand.

[2] Department of Microbiology and Immunobiology, Harvard Medical School, Boston, MA, USA.

INTRODUCTION

Acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) previously known as early mortality syndrome (EMS) is a shrimp bacterial disease that caused by *Vibrio parahaemolyticus* (Vp). The bacterium harbors a 69 kb unique virulence plasmid (pVA1) containing *pirA* and *pirB* genes which encoded for $PirA^{vp}$ and $PirB^{vp}$ toxin respectively (Han *et al*., 2015; Lee *et al*., 2015). AHPND Vp affects black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) and whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) within the first 20 - 30 days after a pond is stocked with post-larvae and can cause up to 100% mortality (Tran *et al.,* 2013; Schryver *et al*., 2014). The infected shrimp develop clinical sign consisting of lethargy, low speed in growth rate, spiral swimming, empty or interrupted gut, and abnormal hepatopancreas (Mohammad and Banaederakhshan, 2015).

Marine yeasts can produce bioactive substances such as polyamine, astaxanthin, carotenoid, trehalose, glutathione (Zhenming *et al*., 2006). In addition, some yeast components including β-glucans, mannoproteins can stimulate host immunity and possess antioxidant properties (Navarrete and Ramírez, 2014). Moreover, yeasts are capable to adhere to the intestinal muscosa provide potential application as a probiotic supplement for human and animal health (Gama *et al*., 2001). Due to the antibiotic resistant gene transferred among yeasts and bacteria has not been reported, yeasts have been recognized as safe biocontrol agent (Nayak, 2011).

The aim of the present study was to isolate marine yeasts that inhibit AHPND Vp and identify by PCR targeted to the internal transcribed spacer (ITS) region.

MATERIALS AND METHODS

1. Yeast isolation

Natural shrimps were collected from a Yor island and retail markets in Songkhla province, Thailand. The intestine of each shrimp was pre-enriched in Sabouraud dextrose broth (SDB) supplemented with 50 µg/ml gentamicin and incubated at room temperature for 48 h. Then, the enrichments were streaked on potato dextrose agar (PDA) supplemented with 50 µg/ml gentamicin and incubated at room temperature. After 48 h incubation, at least one of representative colony was randomly selected and kept at -80^{o}C for further investigation.

2. AHPND *V. parahaemolyticus* (AHPND Vp)

AHPND Vp PSU 5600 from the culture collection of the Department of Microbiology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Thailand, was used to determine inhibitory activity of the marine yeasts.

3. Determination of inhibitory activity of yeast isolates against AHPND Vp

The inhibitory activity was determined using modified agar well technique. The isolated yeast were grown on PDA at room temperature for 48 h and stabbed into the agar block derived from PDA punched with sterile capillary tube. After incubation for 48 h at room temperature, this agar block was placed into the well of Mueller Hinton agar that spread with AHPND Vp and incubated for 24 h at room temperature. The diameter of inhibition zone was determined as inhibitory activity of the yeasts. The experiment was carried out in triplicate.

4. Yeast identification

Selected yeast isolates that posses high inhibitory activity against AHPND Vp were identified by extraction of yeast genomic DNA using the ZR Fungal/Bacterial DNA MiniPrep™ kit following the manufacturer's instructions. The species identification was performed by PCR targeting the internal transcribed spacer (ITS) region using primer ITS1F (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') and ITS4R (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') (White *et al*., 1990). ITS region amplification was performed in 20 µl reaction volume containing 2 µl of extracted DNA, 4 µl of 5x buffer, 10.3 µl of milliQ water, 1.6 µl of 2.5 mM dNTP mixture, 1 µl of 10µM of each primer and 0.1 µl of 5 U/µl *GoTaq* DNA polymerase. For the cycling conditions, the initial denaturation was done at 95°C for 5 min, follow by 35 cycles of 94°C for 1 min, 55°C for 2 min, 72°C for 2 min and a final extension at 72°C for 10 min. The PCR was performed in T100 TM Thermal Cycler (Bio-Rad, USA) and PCR product was visualized after electrophoresis in 1% agarose gel at a voltage of 100 V cm^{-1} for 60 min. The PCR products were purified using a GenepHlow™ Gel/PCR kit and sequenced. The obtained sequences were compared with the GenBank database using nucleotide blast.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Yeast isolation

Thirty five and thirty one natural shrimp samples were collected from a Yor island and retail markets respectively, 232 yeast isolates were selected and tested againt AHPND Vp (Table 1).

Table 1 Isolation of marine yeasts.

Source of samples	No. of samples	No.of yeast isolates
Yor island	35	139
Retail market	31	93
Total	66	232

2. The inhibitory activity of yeast isolates toward AHPND Vp

Using modified agar well technique, 7 and 15 of yeast isolates obtained from Yor island and retail market respectively exhibited inhibitory activity toward AHPND Vp with the inhibition zone between 8.9 and 20.3 mm (Figure 1 and Figure 2). Interestingly, 13 out of 22 yeast isolates designated as I15, I27, I28, I32, I33, I41, NI5, PY15, PY39, S13, Y4, IY3-5 and IY3-10 displayed high inhibitory activity againt AHPND Vp. The isolate I27 showed highest activity with 20.3 mm of inhibition zone diameter whereas the isolate I26 had lowest inhibitory activity with diameter of 8.9 mm. Previously, cross streak technique is used for rapid screening microorganisms to evaluate antagonistic activity (Lertcanawanichakul and Sawangnop, 2008). However, if the growth rate of two organisms is different, inhibitory activity cannot be observed clearly. Therefore, the inhibitory activity of yeast isolates toward AHPND Vp were performed by modified agar well technique, the agar blocks support the growth of yeasts which their generation times are normally longer than bacteria. Additionally, their inhibitory substances are usually produced during stationary or decline phase and these will be kept in the agar blocks. After the agar block is filled in the bacterial lawn, diffusion of antimicrobial molecules toward surrounding bacterial cells exhibits clear zone which is similar to disk diffusion assay for antibiotic susceptibility test and is easy to be determined, thus it is very useful for screening the inhibitory activity of yeasts against bacteria.

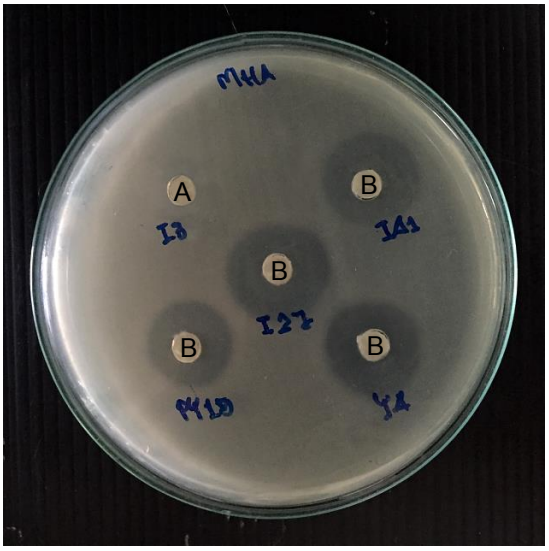


Figure 1 Inhibitory activity of yeast isolates against AHPND Vp on modified agar well plate.
A: Negative, B: Positive

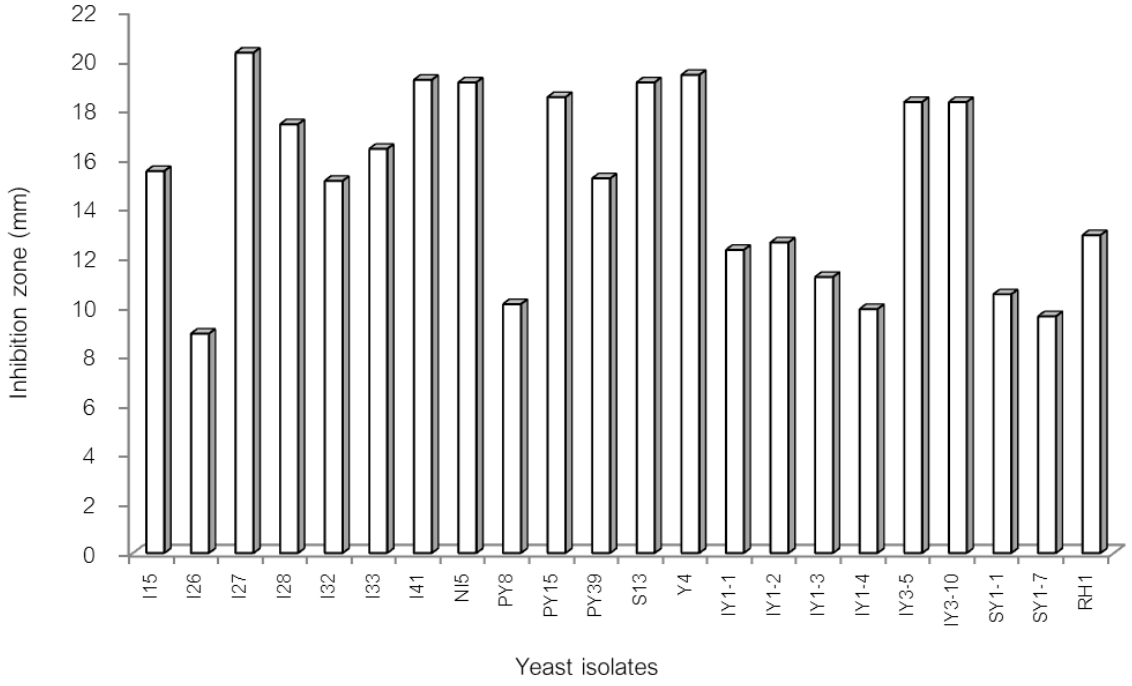


Figure 2 The inhibitory activity of 22 yeast isolates toward AHPND Vp.

3. Colony and morphology of yeast isolates

Most of the yeast isolates againt AHPND Vp possessed butyrous cream colored colonies on PDA (Figure 3A). However, some yeast isolates had glabrous white colored colonies (Figure 3B). The morphology under microscope included ellipsoidal and ovoid cells (Figure 3C and Figure 3D).

4. Yeast identification

High inhibitory activity of thirteen yeast isolates were identified by PCR targeted to the internal transcribed spacer (ITS) region and confirmed by sequencing. Seven, four, one and one isolates were identified as *Trichosporon* spp., *Candida* spp., *Saccharomyces* sp. and *Yarrowia* sp. respectively with 97-100% homology to the GenBank sequences (Table 2). ITS region sequencing has been demonstrated effectiveness in genera identification of yeast isolates. ITS sequencing of 146 filamentous fungi was 97.7% homology to the reference strains in genera level (Kwiatkowki *et al.*, 2012). Hesham *et al.*, 2014 reported that PCR amplification and sequence analysis of ITS region revealed two yeast were highly related to *Kluyveromyces marxianus* and *Kluyveromyces lactis* with homology of 99%. The ITS region contains high conservation and variable non-coding sequences, thus, it is a good marker for evaluation the relatedness of the different genera and species of yeast (Groenewald *et al.*, 2011).

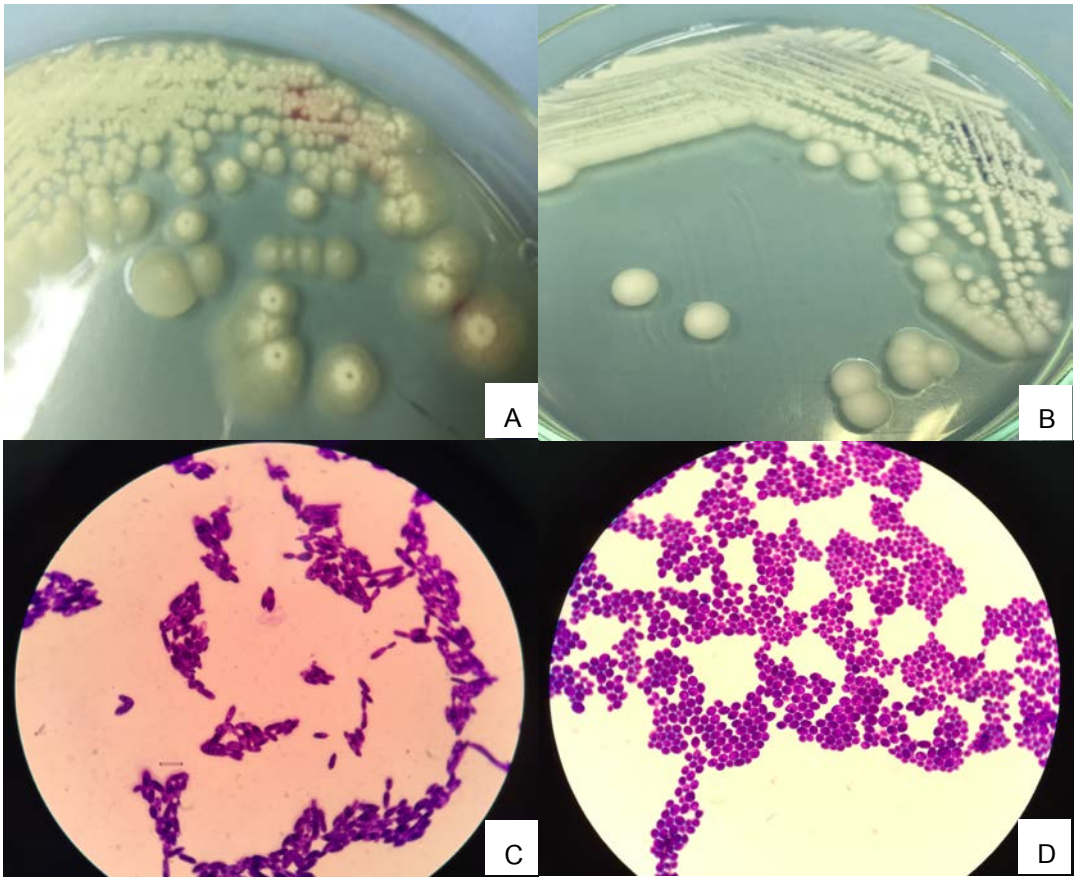


Figure 3 Colonies on PDA plate (A and B) and morphology under microscope (C and D) of yeast isolates.

Table 2 Identification of marine yeasts.

ITS region	No. of strains	% homology
Trichosporon spp.	7	97-100
Candida spp.	4	97-100
Saccharomyces sp.	1	98
Yarrowia sp.	1	99

CONCLUSION

In this work, 4 genera of yeasts were isolated and their inhibitory activity against AHPND Vp was demonstrated. It is of interested to evaluate these yeasts in vivo to select the most potential one for control AHPND Vp.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported in part by a subcontract from grant A27134 from CPF (Thailand) awarded to Harvard University.

REFERENCES

Gama, L., F. Ascencio and B. Ho. 2001. **Probable application of marine yeasts as probiotic supplements**. Http://www. np. edu. sg/.

Groenewald, M., V. Robert and M.Th. Smith. 2011. The value of the D1/D2 and internal transcribed spacers (ITS) domains for the identification of yeast species belonging to the genus *Yamadazyma*. **Persoonia**. 26: 40-46.

Han, J.E., K.F.J. Tang, L.H. Tran and D.V. Lightner. 2015. Photorhabdus insect-related (Pir) toxin-like genes in a plasmid of *Vibrio parahaemolyticus*, the causative agent of acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) of shrimp. **Diseases of Aquatic Organisms**. 113: 33-40.

Hesham, A.E.L., V. Wambui, H. Ogola and J.M. Maina. 2014. Phylogenetic analysis of isolated biofuel yeasts based on 5.8S-ITS rDNA and D1/D2 26S rDNA sequences. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**. 12: 37-43.

Kwiatkowki, N.P., W.M. Babiker, W.G. Merz, K.C. Carroll and S.X. Zhang. 2012. Evaluation of nucleic acid sequencing of the D1/D2 region of the large subunit of the 28S rDNA and the Internal transcribed spacer region using SmartGene IDNS software for identification of filamentous fungi in a clinical laboratory. **The Journal of Molecular Diagnostics**. 14: 393-401.

Lee, C.T., I.T. Chen, Y.T. Yang, T.P. Ko, Y.T. Huang, J.Y. Huang, M.F. Huang, S.J. Lin, C.Y. Chen, S.S. Lin, D.V. Lightner, H.C. Wang, A.H.J. Wang, H.C. Wang, L.I. Hor and C.F. Lo. 2015. The opportunistic marine pathogen *Vibrio parahaemolyticus* becomes virulent by acquiring a plasmid that expresses a deadly toxin. Proc. **The National Academy of Sciences of the United States of America**. 112: 10798-10803.

Lertcanawanichakul, M. and S. Sawangnop. 2008. A comparison of two methods used for measuring the antagonistic activity of Bacillus species. **Walailak Journal of Science and Technology**. 5: 161-171.

Mohammad, J.Z. and R. Banaederakhshan. 2015. Early mortality syndrome (EMS) as new emerging threat in shrimp industry. **Advances in Animal and Veterinary Sciences**. 2: 64-72.

Navarrete, P. and D.T. Ramírez. 2014. Use of yeasts as probiotics in fish aquaculture, Chap. 5. *In* **"Sustainable Aquaculture Techniques"**. M. HernandezVergara and C. Pérez-Rostro (eds). 135-172.

Nayak, S.K. 2011. **Biology of Eukaryotic Probiotics.** Laboratory of Fish Pathology, Department of Veterinary Medicine, Nihon University, Japan. 33-35.

Schryver, P.D., T. Defoirdt and P. Sorgeloos. 2014. early mortality syndrome outbreaks: A microbial management issue in shrimp farming?. **PLOS Pathogens magazines.** 10: 1-2.

Tran, L., L. Nunan, R.M. Redman, L.L. Mohney, C.R. Pantoja, K. Fitzsimmons and D.V. Lightner. 2013. Determination of the infectious nature of the agent of acute hepatopancreatic necrosis syndrome affecting penaeid shrimp. **Diseases of Aquatic Organisms.** 105: 45-55.

White, T.J., T. Bruns, S. Lee and J. Taylor. 1990. **Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics.** 315-322.

Zhenming, C., L. Zhiqiang, G. Lingmei, G. Fang, M.A. Chunling, W. Xianghong and L. Haifeng. 2006. Marine yeasts and their applications in mariculture. **Journal of Ocean University of China.** 5: 251-256.

องค์ประกอบทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดตำรับประสะไพล

Chemical Composition and Biological Activities of Prasaplai Extract

สุพนิดา วินิจฉัย[1] นัดดามาศ โตมอญ[1] ภารดี อสุโกวิท[1] วราวุฒิ ศุภมิตรมงคล[1]
ชลลดา บุราชรินทร์[1] และ พัลลภา วุฒิภาพรกุล[1*]
Supanida Winitchai[1], Naddamas Tomon[1], Paradee Asugovit[1], Warawut Suphamitmongkol[1],
Chunlada Buratcharin[1] and Punlapa Vutdhipapornkul[1*]

บทคัดย่อ

ประสะไพลเป็นตำรับยาแผนไทยใช้เป็นยาบรรเทาอาการปวดประจำเดือน และปรับระบบประจำเดือน ซึ่งประกอบด้วยสมุนไพร 10 ชนิด ได้แก่ ว่านน้ำ กระเทียม มะกรูด ขมิ้นอ้อย หอมแดง เทียนดำ ดีปลี พริกไทย ไพล ขิง และแร่ธาตุอีกสองชนิด คือ การบูร และเกลือสินเธาว์ การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของตำรับสารสกัดประสะไพลที่ได้จากการสกัดด้วยเอทานอล จากการสกัดตำรับประสะไพลด้วยเอทานอล พบว่าให้ปริมาณสาร DMPBD ที่ร้อยละ 3.34 จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเทรี (GC-MS) จากการศึกษาแร่ธาตุสำคัญไม่เกินมาตรฐานกำหนด ปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรดเท่ากับ 0.08 กรัม/100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณเถ้าที่ละลายในน้ำเท่ากับ 2.38 กรัม/100 กรัมตัวอย่าง และการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยวิธี Resazurin Test พบว่าทุกความเข้มข้น (0.0001-1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ผิวหนัง และมีแนวโน้มกระตุ้นการสร้างคอลลาเจลในเซลล์ Fibroblast ด้วยวิธี Sirius Red และฤทธิ์ต้านการอักเสบ (Anti-Inflammatory) ต่อเซลล์ RAW264.7 ด้วยวิธี Griess reaction มีร้อยละการยับยั้งเท่ากับ 21.45

ABSTRACT

Prasaplai is Thai Traditional medicine used to treat dysmenorrhea. This medicine consists of ten herbs, which are sweet sedge, garlic, kaffir lime, turmeric, shallot, Tien dum (seed), Long Pepper, Plai and ginger, as well as two minerals, which are camphor and rock salt. The aim of this study was to investigate the chemical composition and biological activity of Prasaplai extract. The ethanol extract of prasaplai was found to contain 3.34% DMPBD as determined by GC-MS analysis. The acid-insoluble ash and water-insoluble ash were found to be 0.08 mg/100 g sample and 2.38 mg/100 g sample, respectively was measured using the MTT assay. It was found that the CC_{50} value of the treated cells in prasaplai extract was 0.0001-1 mg/mL, which was not toxic to fibroblast cell line. The stimulating activity of collagen by prasaplai extract was strong and the anti-Inflammatory effect on RAW264.7 cell by Griess reaction was IC_{50} of 21.45 %

Key Words: PRASAPLAI extract, chemical composition, biological activities

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

[1]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute

คำนำ

ประสะไพลเป็นหนึ่งในตำรับยาไทยที่มีสรรพคุณช่วยบำรุงโลหิต แก้ระดูมาไม่ปกติ แก้จุกเสียด แก้ปวดประจำเดือน และช่วยให้ประจำเดือนมาสม่ำเสมอ สารสำคัญที่พบในตำรับประสะไพล คือ สาร (*E*)-1-(3,4-dimethoxyphenyl) butadiene (DMPBD) ในพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน ยาประสะไพล หมายถึงยาประเภทซึ่งตามปกติเข้าเครื่องยาสิ่งหนึ่ง ซึ่งเป็นตัวหลักมีปริมาณเท่ากับเครื่องยาอื่นๆอีกหลายอย่างรวมกัน เรียกชื่อตามเครื่องยาที่เป็นหลัก (พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน, 2542) ยาประสะไพล หมายถึง ยาตำรับที่มีไพลหนัก 81 ส่วน และมีส่วนประกอบของสมุนไพรอื่นๆ เช่น ผิวมะกรูด กระเทียม หัวหอม พริกไทย ดีปลี ขิง ขมิ้นอ้อย เทียนดำ เกลือสินเธาว์หนักสิ่งละ 8 ส่วน และการบูรหนัก 1 ส่วน รวมกันเท่ากับน้ำหนักของไพล (วุฒิ, 2540) โดยจากรายงานพบว่าประสะไพลมีฤทธิ์ในการลดอาการปวดเกร็งของมดลูก จึงเป็นตำรับที่ถูกนำมาใช้เพื่อผู้หญิงโดยเฉพาะช่วงหลังคลอดที่ต้องการขับน้ำคาวปลา ขับเลือดเสีย ช่วยให้มดลูกเข้าอู่เร็ว บำรุงร่างกาย บำรุงน้ำนม

การศึกษาครั้งนี้มีแนวคิดที่จะนำตำรับยาสมุนไพรไทยประสะไพลกลับมาใช้ในสถานีอนามัยและโรงพยาบาลให้มากขึ้น ทั้งนี้เพื่อลดการนำเข้ายาจากต่างประเทศโดยเฉพาะกลุ่มยาแก้ปวด เช่น พาราเซตามอล หรือ แอสไพริน ได้ โดยการนำมาพัฒนาและผลิตเป็นยาแผนโบราณที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพเพื่อป้องกันและบรรเทาอาการปวดเกร็งของมดลูกได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากสมุนไพรในตำรับประสะไพล

นำตัวอย่างสมุนไพรในตำรับประสะไพลโดยนำสมุนไพรแห้งจำนวน 10 ชนิด และแร่ธาตุ 2 ชนิด ได้แก่ เหง้าไพล ผิวมะกรูด รากว่านน้ำ หัวกระเทียม หัวหอมแดง เมล็ดพริกไทย ผลดีปลี เหง้าขิง เหง้าขมิ้นอ้อย เมล็ดเทียนดำ เกลือสินเธาว์ และการบูร มาบดให้เป็นผงเพื่อลดขนาดอนุภาคให้มีขนาด 60-100 mesh นำไปสกัดด้วยวิธีการหมักด้วยเอทานอล 95% โดยบรรจุลงในถังสแตนเลสปริมาตร 5 ลิตร จากนั้นเติมเอทานอล 750 มิลลิลิตร ให้ท่วมตัวอย่างประสะไพล ปิดปากถังสแตนเลสด้วยพาราฟิล์มแช่ทิ้งไว้ 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นกรองเอากากประสะไพลออก โดยใช้กระดาษกรองเบอร์1 แล้วนำกากประสะไพลมาสกัดซ้ำด้วยเอทานอลตามวิธีข้างต้น นำสารสกัดประสะไพลครั้งที่ 1 และ2 รวมกัน นำไประเหยเอาเอทานองออกด้วยเครื่อง Vacuum rotary evaporator โดยใช้อุณหภูมิ 40°C ที่ความดัน 170 มิลลิบาร์ ได้สารสกัดหยาบ(Crude extract) นำไปล้างเอา wax ออกด้วยเอทานอลเย็นจำนวน 8 ครั้ง จากนั้นกรองและระเหยเอทานอลออก สารสกัดที่ได้เป็นเรียกว่าสารสกัดหยาบ(Crude extract) เก็บรักษาในขวดสีชาที่อุณหภูมิ 4 °C ก่อนนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพ

การวิเคราะห์แร่ธาตุในตำรับประสะไพล

นำผงสารสกัดตำรับประสะไพลชั่งตัวอย่าง จำนวน 300 กรัม ใส่ถุงพลาสติกที่ติดฉลากไว้ ศึกษาความเข้มข้นโลหะหนัก สารหนู, โคบอลต์, ตะกั่ว, เซเลเนียม ตามวิธีการที่กำหนดไว้ (EPA Method 6020) วิเคราะห์ตัวอย่างโดยเครื่อง Inductively Couple Plasma-Mass Spectroscopy (ICP-MS) ส่วนแคลเซียม, โครเมียม,

ทองแดง, เหล็ก, แมกนีเซียม, แมงกานีส, แทสเซียม, โซเดียม และสังกะสี ใช้วิธีการ ที่กำหนดไว้ (EPA Method 6010B) วิเคราะห์ตัวอย่างโดยเครื่อง Inductively Couple Plasma Atomic emission Spectroscopy (ICP-AES) และปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรดและละลายน้ำใช้วิธี In-house method based on AOAC (2012) 920.100

การศึกษาปริมาณสารสำคัญของสารสกัดตำรับประสะไพล (อรุณพร อิฐรัตน์, 2553)

การเลือกสภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี /แมสสเปกโทรเมตรีใช้คอลัมน์ DB-5MS 30 m x 250 μm x 0.25 μm ใช้ดีเทคเตอร์เป็น Mass spectrometer อุณหภูมิ heater 280 °C ที่ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที แล้วใช้ 60 °C/min จนถึง 220 °C

การทดสอบความเป็นพิษของสารสกัดตำรับประสะไพลในเซลล์เพาะเลี้ยงของ Human mast cell line ด้วยวิธี Resazurin Test

Resazurin Test เป็นการศึกษาการมีชีวิตรอดของเซลล์ โดย resazurin เป็น redox dye ซึ่งจะมีสีน้ำเงิน เมื่อ resazurin อยู่ในเซลล์สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมหรือแบคทีเรียที่มีชีวิต resazurin จะถูกดึงเข้าสู่กระบวนการ metabolize แล้วจะถูกเอนไซม์จำพวก reductase เปลี่ยนโมเลกุลเป็น resorufin ซึ่งมีสีแดง โดยการเปลี่ยนแปลงสีนั้นสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 450 nm ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนของเซลล์ที่มีชีวิต จะทำให้สามารถคำนวณอัตราการมีชีวิตรอดของเซลล์หลังจากที่ได้รับสารเทียบกับกลุ่ม control โดยให้ร้อยละการเจริญของกลุ่ม control เท่ากับ 100 การวิเคราะห์ทางสถิติจะใช้วิธี T-test ที่นัยสำคัญ $p < 0.05$ โดยมีสูตรคำนวณดังนี้ % viability = (As/Ac) x100 โดยที่ Ac คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ control และ As คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

การทดสอบฤทธิ์ต้านการอักเสบ (Anti-inflammatory activity) ของสารสกัดตำรับประสะไพล (Tewtrakul and Itharat, 2007; Tewtrakul and Subhadhirasakul, 2008)

เลี้ยงเซลล์ RAW 264.7 ใน 96 well-plates (cell มีความเข้มข้น 1 x 10^5 cell/well) ในอาหารเลี้ยงเซลล์ชนิด 10% FBS-DMEM ที่มี 4 mM L-glutamine 25 mM D-glucose และ 1 mM sodium pyruvate (Gibco/Invitrogen, สหรัฐอเมริกา) และบ่มเซลล์ที่อุณหภูมิ 37 °C ในคาร์บอนไดออกไซด์ 5 % (ปริมาตรต่อปริมาตร) นาน 1 hr หลังจากนั้นดูดสารละลายเก่าออกเติม LPS 5 μg/ml ที่อยู่ใน RPMI ลงในหลุมละ 100 μL เฉพาะหลุม control และ sample ส่วน blank จะใส่ RPMI จากนั้นเติมสารสกัดสมุนไพรจำนวน 100 μL ในหลุมของ sample และ blank of sample ส่วนหลุมของ sample และ blank of control ให้เติม RPMI แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C 48 hr หลังจากนั้นดูด supernatant แต่ละหลุมมา 100 μL ใส่ใน 96 well-plates เติมสารละลาย Griess หลุมละ 100 μL เคาะ plate เบาๆ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 570 nm ส่วน supernatant ที่เหลือใน plate แรก เติม MTT หลุมละ 10 μL เคาะ plate เบาๆ แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C 2 hr ดูด supernatant ออกทุกหลุม เติม 0.04 M HCl ใน isopropanol 100 μL เขย่า วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 570 นาโนเมตร คำนวณค่าความเข้มข้นของไนไตรท์ในอาหารเลี้ยงเซลล์โดยเทียบจากกราฟมาตรฐานของโซเดียมไนไตรท์ ($NaNO_2$) ที่ความเข้มข้น 0-50 μM และคำนวณ % การยับยั้งการผลิตไนตริกออกไซด์ของสารสกัดแต่ละส่วนในพืชแต่ละชนิด โดย

เปรียบเทียบกับการผลิตไนตริกออกไซด์ในเซลล์ที่สัมผัสกับ LPS เพียงอย่างเดียว ใช้สาร aminoguanidine เป็นสารควบคุมแบบบวก ในการยับยั้งการผลิตไนตริกออกไซด์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากสมุนไพรในตำรับประสะไพล

นำผงสมุนไพรที่บดและผสมอัตราส่วนตามตำรับประสะไพลแล้ว นำไปหมักด้วยเอทานอล 95% แล้วนำน้ำหมักที่กรองได้ไประเหยตัวทำละลายออก จะได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิต (% yield) เท่ากับ 7.45%

การวิเคราะห์แร่ธาตุในตำรับประสะไพล

จากผลการวิเคราะห์แร่ธาตุด้วยวิธีมาตรฐานที่กำหนดของตัวอย่างตำรับประสะไพล พบว่า ในตำรับแคปซูลประสะไพลมีปริมาณเถ้าไม่เกิน 10 % และปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรดไม่เกิน 2% ซึ่งได้ผลตามข้อกำหนดมาตรฐาน นั่นคือ 0.08 g/100 g sample ส่วนปริมาณเถ้าที่ละลายในน้ำให้ผลเท่ากับ 2.38 g/100 g sample ซึ่งจะทำให้เห็นว่าในตำรับประสะไพลมีสารที่เป็น Inorganic แร่ธาตุต่างๆ ในตำรับในปริมาณเล็กน้อย (Table 1)

Table 1 The minerals in Prasaplai extracts

Description	Analytical Result	Method
Ash insoluble in acid	0.08 g/100 g sample	In-house method based on AOAC (2012) 920.100 (E)
Moisture	4.01 g/100 g sample	AOAC (2012) 925.45 (A)
Phosphorus (P_2O_5)	0.31 g/100 g sample	AOAC (2012) 986.24
Ash soluble in water	2.38 g/100 g sample	In-house method based on AOAC (2012) 920.100 (B)
Arsenic	Not found	In-house method based on EPA Method 6020
Calcium	1062.66 ppm	In-house method based on EPA Method 6010B
Cobalt	0.069 ppm	In-house method based on EPA Method 6020
Copper	1.53 ppm	In-house method based on EPA Method 6010B
Iron	119.57 ppm	In-house method based on EPA Method 6010B
Lead	0.19 ppm	In-house method based on EPA Method 6020

Table 1 (continue)

Magnesium	877.18 ppm	In-house method based on EPA Method 6010B
Manganese	124.01 ppm	In-house method based on EPA Method 6010B
Potassium	5477.82 ppm	In-house method based on EPA Method 6010B
Selenium	Not found	In-house method based on EPA Method 6020
Sodium	5369.30 ppm	In-house method based on EPA Method 6010B
Zinc	8.65 ppm	In-house method based on EPA Method 6010B

การศึกษาปริมาณสารสำคัญของสารสกัดตำรับประสะไพล

จากการศึกษาปริมาณสารสำคัญของสารสกัดตำรับประสะไพล พบว่าในสารสกัดประสะไพลที่ Retention time (RT) 38.83 มีสาร DMPBD จากการหมักด้วย 95 % เอทานอล จะให้ปริมาณสารสกัดได้สูงสุดที่ร้อยละ 3.34 (Table 2) ซึ่งให้ค่าที่แตกต่างกัน วิธีการนี้ให้สาร DMPBD เป็นตัวบ่งชี้ (Marker) ให้ผลสอดคล้องกับผลงานของมงคลศิลป์ บุญเย็น (2554) ที่ได้สกัดประสะไพลด้วยการหมักใน 95% เอทานอล เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟีพบว่ามีสาร DMPBD ในช่วง RT ที่ 38 เช่นกัน

Table 2 The substance of Prasaplai extract

Retention time (RT)	Components	Area (%) Crude extract
11.69	camphor	2.29
25.43	vanillin	1.29
30.44	methylvanillin	5.53
38.50	cis-asarone	10.34
38.83	(*E*)-1-(3,4-dimethoxyphenyl) butadiene(DMPBD)	3.34
40.56	α-tumeronr	3.17
43.55	β-tumerone	1.39
45.28	ethyl p-methoxycinnamate	3.24
51.37	(*E*)-4-(3′,4′-dimethoxyphenyl)but-3-en-1-ol	16.30

การทดสอบความเป็นพิษของสารสกัดตำรับประสะไพลในเซลล์เพาะเลี้ยงของ Human mast cell line ด้วยวิธี Resazurin Test

ผลการตรวจค่าความเป็นพิษ (Cytotoxicity) ของสารสกัดตำรับประสะไพลด้วยวิธีวิเคราะห์ร้อยละของจำนวนเซลล์ที่มีชีวิต (% cell viability) พบว่า สารสกัดตำรับประสะไพลที่ใช้ทดสอบในทุกความเข้มข้นต่ำ (0.0001–0.001 mg/mL) ไม่มีผลเปลี่ยนแปลงของจำนวนเซลล์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ผิวหนัง (Human skin fibroblast) นอกจากนี้เมื่อทดสอบในเซลล์ที่กระตุ้นด้วยสาร DMEM ที่มี FBS ร่วมกับสารสกัดตำรับประสะไพล ผลการทดสอบแสดงให้เห็นชัดเจนว่าร้อยละของจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตไม่มีการเปลี่ยนแปลง และยังพบว่ามีแนวโน้มกระตุ้นการสร้างคอลลาเจนในเซลล์ Fibroblast cell ได้เล็กน้อย (Table 3)

Table 3 Effect of Prasaplai extract on collagen stimulation in Fibroblast cell medicine (mg/mL)

Sample	% Collagen stimulation (mg/mL)
Prasaplai extract	6.87±0.14
Ascorbic acid (Control)	34.07±0.03

Test in 3 replicate

จากการตรวจสอบความเป็นพิษของสารสกัดสมุนไพรต่อเซลล์ RAW 264.7 พบว่า สารละลายที่ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่มีความเป็นพิษ คือ 0.1 mg/mL ซึ่งสารสกัดตำรับประสะไพลที่ความเข้มข้นนี้ได้ถูกคัดเลือกเพื่อทำการทดสอบฤทธิ์ต้านอักเสบจากกระบวนการยับยั้งการผลิตไนตริกออกไซด์ด้วยวิธี Griess reaction

การทดสอบฤทธิ์ต้านการอักเสบ (Anti-inflammatory activity) ของสารสกัดตำรับประสะไพล

พบว่าสารสกัดตำรับประสะไพลให้ฤทธิ์ยับยั้งไนตริกออกไซด์ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ($p < 0.05$) เนื่องจากสามารถลดการสร้าง NO/ROS ในลักษณะที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารและสามารถลดการสังเคราะห์เอนไซม์ iNOS ภายในเซลล์แมคโครฟาจที่ถูกกระตุ้นด้วย LPS และ IFN-γ ได้ชัดเจน และยังพบว่าทั้งสารสกัดตำรับประสะไพลในทุกความเข้มข้นที่ทดสอบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตของเซลล์แมคโครฟาจ โดยพบว่าสารสกัดตำรับประสะไพลร้อยละของการยับยั้งเท่ากับ 21.45±0.18 ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ มงคลศิลป์ บุญเย็น (2554) โดยมี Diclofenac เป็นสารควบคุม ซึ่งมีร้อยละการยับยั้งเท่ากับ 68.57% (J.C.W. Tam et al., 2011) (Table 4) ดังนั้นจากการศึกษานี้ได้ชี้ให้เห็นว่าในเบื้องต้นว่าทั้งสารสกัดและตำรับแคปซูลประสะไพลมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยยับยั้งการสร้าง NO และลดการสังเคราะห์เอนไซม์ iNOS

Table 4 Effect of Prasaplai extract and Prasaplai a Thai medicine on RAW 264.7 inhibition

Herb	% Inhibition of Nitric Oxide
Prasaplai extract	21.45±0.18
Diclofenac	68.57±0.08

Test in 3 replicate

สรุป

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของตำรับประสะไพลมีปริมาณของสารชนิดอนินทรีย์ต่างๆในปริมาณน้อย สารสำคัญของสารสกัดตำรับประสะไพลที่พบ คือ DMPBD ที่มีฤทธิ์ในการลดอาการปวดเกร็ง ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ผิวหนัง นอกจากนี้ยังมีมีแนวโน้มกระตุ้นการสร้างคอลลาเจนในเซลล์ Fibroblast cell ได้เล็กน้อย มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยยับยั้งการสร้าง NO และลดการสังเคราะห์เอนไซม์ iNOS และยังพบว่าสามารถออกฤทธิ์ต้านการอักเสบได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์การมหาชน) ผู้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย และห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเพื่อสุขภาพและเครื่องสำอาง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนสถานที่ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน, 2542 สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พศจิกายน 2560, จาก http://rirs3.royin.go th/New-search/word-search-all-x.asp

มงคลศิลป์ บุญเย็น. 2554. สมุนไพร อาหาร การลับสมอง ปัจจัยสำคัญป้องกันอัลไซเมอร์, น. 80-82. *ใน* **บีเวลล์ 73(7)**

วุฒิ วุฒิธรรมเวช. 2540. **สารานุกรมสมุนไพร. รวมหลักเภสัชกรรมไทย**. โอ.เอส.พริ้นติ้งเฮ้าส์, กรุงเทพฯ. 618 น

อรุณพร อิฐรัตน์. 2553. **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาประสิทธิผลและความปลอดภัยของตำรับยาประสะไพล ในการรักษากลุ่มอาการทางสูติ-นรีเวชวิทยา**. เอกสารไม่ตีพิมพ์, คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

AOAC. **Official Methods of the Association of Official Analytical Chemists**. 17th ED. Association of Official Analytical Chemists: Gaithersburg. 2012.

Tewtrakul, S. and Itharat, A. 2007. Nitric oxide inhibitory substances from the rhizome of *Dioscorea membranacea*. ***J ethnopharmacol*** 109(3): 412-6

Tewtrakul, S. and Subhadhirasakul, S. 2008. Effect of compounds from Kaempferia *parviflora* on nitric oxide, prostaglandin E2 and tumor necrosis factor-alpha productions in RAW264.7 macrophage cell. ***J ethnopharmacol*** 120(1): 81-4

Jacqueline Chor Wing Tama, Kit Man Laua, Cheuk Lun Liua, Ming Ho Toa, Hin Fai Kwok, Kwok Kin Lai, Clara Bik San Lau. (2011). The in vivo and in vitro diabetic wound healing effects of a 2-herb formula and its mechanisms of action. ***Journal of Ethnopharmacology, 134, 831–838.***

การประกันคุณภาพการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในน้ำประปา

(Quality Assurance for Gross Alpha and Gross Beta Measurement in Tap Water)

สุนทรี แก้วผลึก[1*] ทัศนีย์ สายเงิน[1] และ ยุทธนา ตุ้มน้อย[1]

Suntaree Kaewpaluek[1*], Tussanee Saingern[1] and Yutthana Tumnoi[1]

บทคัดย่อ

ห้องปฏิบัติการกลุ่มเฝ้าตรวจกัมมันตภาพรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ได้เข้าร่วมกิจกรรมเปรียบเทียบผลระหว่างห้องปฏิบัติการของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในตัวอย่างน้ำประปา ประจำปี พ.ศ. 2557-2559 จัดโดยทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ (The International Atomic Energy Agency, IAEA) ในกิจกรรม IAEA-TEL-2014-2016-ALMERA Proficiency Testing Program ได้ตรวจวัดตัวอย่างน้ำประปาที่มีการเติมนิวไคลด์กัมมันตรังสี (Spiked water samples) ตามวิธีมาตรฐานขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งอเมริกา หมายเลขวิธี 900.0 (U.S. EPA Method 900.0) และได้รับการประเมินความสามารถของห้องปฏิบัติการด้านการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในตัวอย่างน้ำประปาโดยสถิติ Robust Z-Score มีค่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ (accepted, Z<2)

ABSTRACT

A Laboratory of Radiation Monitoring Group, Office of Atoms for Peace (OAP) participated in the Proficiency Testing for gross-alpha and gross-beta radioactivity in tap water samples. The testing was conducted by The International Atomic Energy Agency (IAEA) between 2014 and 2016 under the framework of IAEA-TEL-2014-2016-ALMAERA Proficiency Testing Program. Radionuclide-added tap water samples (Spiked water samples) were analysed following the standard test method of the U.S. Environmental Protection Agency; Method 900.0 (U.S.EPA Method 900.0). Based on an evaluation of the analysed values using Robust Z-Score, those values are acceptable (Z<2) indicating that the lab is capable of measuring gross-alpha and gross-beta radioactivity in tap water.

คำนำ

แหล่งน้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปาอาจมีการปนเปื้อนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้งที่มีแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติในอนุกรมการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียมและทอเรียม ได้แก่ เรเดียม-226 (Ra-226), เรเดียม-228 (Ra-228), ยูเรเนียม-234 (U-234), ยูเรเนียม-238 (U-238) และตะกั่ว-210 (Pb-210) โดยธาตุกัมมันตรังสีเหล่านี้จะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาหรือกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟา ในส่วนของแหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น ได้แก่ ซีเซียม-137 (Cesium-137) และ สทรอนเซียม-90 (Strontium-90) รวมทั้งไอโซโทปรังสีตามธรรมชาติของธาตุโพแทสเซียม (K-40) จะสลายตัวให้รังสีบีตาหรือกัมมันตภาพรังสีรวมบีตา การตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตา (gross alpha and gross beta activity) เป็นกระบวนการตรวจคัดกรองเบื้องต้น (screening method) ซึ่งไม่สามารถระบุชนิดของเรดิโอนิวไคลด์อย่างเฉพาะเจาะจงได้ แต่สามารถนำผลการตรวจวัดที่ได้มาใช้พิจารณา เพื่อตรวจวิเคราะห์เรดิโอนิวไคลด์เดี่ยวอื่นๆ ที่จำเป็น (single radionuclide) หากพบว่าปริมาณกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตามีค่าสูงกว่าระดับคัดกรอง หรือ screening values (Figure 1) (WHO, 2011)

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) ได้กำหนดวิธีมาตรฐาน หมายเลขวี 900.0 ในการตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในน้ำดื่ม โดยการนำตัวอย่างมาระเหยบนเตาความร้อนสนิทบนจานนับรังสี (counting planchets) และบันทึกน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่ (total dissolved solid) ซึ่งควรมีน้ำหนักของตะกอนภายหลังการระเหยจนแห้งสนิทแล้วไม่เกิน 100 มิลลิกรัม และ 200 มิลลิกรัม หรือมีความหนาแน่นของตะกอน ไม่เกิน 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรของจานนับรังสีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 นิ้ว ในการตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตา ตามลำดับ (Kriger and whittaker, 1980)

กระบวนการควบคุมคุณภาพผลการทดสอบของห้องปฏิบัติการ แบ่งเป็น การควบคุมคุณภาพภายใน (Internal quality control) และการควบคุมคุณภาพภายนอก (External quality control) ห้องปฏิบัติการกลุ่มเฝ้าตรวจกัมมันตภาพรังสี ได้ทำการควบคุมคุณภาพภายในของการตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตา โดยอาศัยแผนภูมิควบคุมชนิด Mean chart หรือ x-chart ในการตรวจวัดอัตราการนับต่อนาที (count per minute) ของกัมมันตรังสีพื้นหลัง (background) และประสิทธิภาพการวัด (efficiency) ของหัววัดรังสี ชนิด gas filled detector ของเครื่องวัดรังสีรวมแอลฟาและบีตาชนิดระดับรังสีพื้นหลังต่ำ (Gross alpha and gross beta counter) ส่วนการควบคุมคุณภาพภายนอกนั้น ห้องปฏิบัติการกลุ่มเฝ้าตรวจกัมมันตภาพรังสี ได้เข้าร่วมกิจกรรมเปรียบเทียบผลระหว่างห้องปฏิบัติการ (Inter-comparison laboratory) จัดโดยทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ (The International Atomic Energy Agency, IAEA) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557-2559 เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของห้องปฏิบัติการว่ามีศักยภาพในระดับใด รวมทั้งเป็นการเตรียมความพร้อมของห้องปฏิบัติการกลุ่มเฝ้าตรวจกัมมันตภาพรังสี เพื่อการขอรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการในขอบข่ายการตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในตัวอย่างน้ำประปาในอนาคตต่อไป

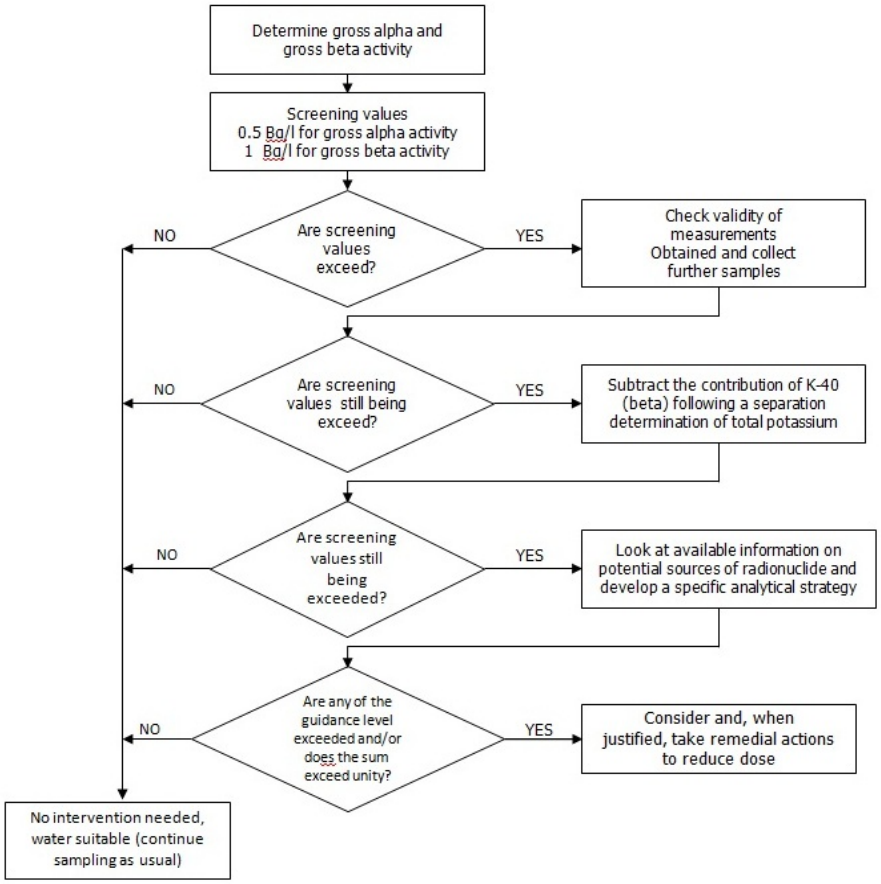


Figure 1 Application of screening and guidance levels for radionuclide in tap water

อุปกรณ์และวิธีการ

1. กระบวนการตรวจวัดน้ำประปาตามวิธีมาตรฐาน (EPA Method 900.0)

1.1 ตวงตัวอย่างน้ำประปาที่ได้รับจากการเข้าร่วมกิจกรรมทดสอบความชำนาญ (a) ในปริมาตรที่เหมาะสมลงในบีกเกอร์ นำไประเหยบนเตาความร้อนจนกระทั่งเหลือปริมาตรประมาณ 5 มิลลิลิตร จากนั้นรินตัวอย่างที่เหลือลงในจานนับรังสี ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียสในการระเหยตัวอย่างอีกครั้งจนแห้งสนิท (b) นำเข้าตู้อบ อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (c) เก็บรักษาสภาพตัวอย่างในตู้ควบคุมความชื้นจนกว่าจะนำไปนับรังสีโดยเครื่องวัดรังสีรวมแอลฟาและบีตาชนิดระดับรังสีพื้นหลังต่ำ (d) (Figure 2)

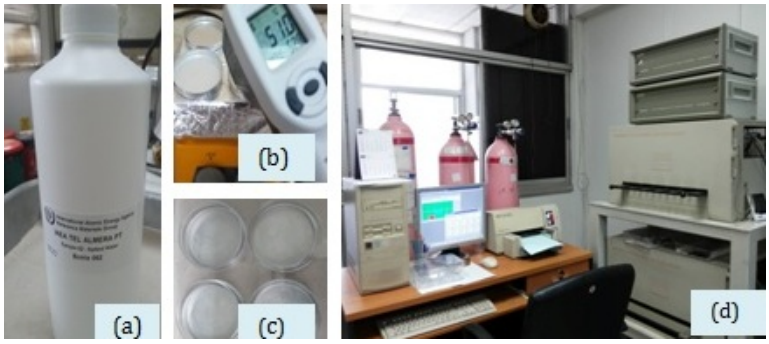


Figure 2 The determination of gross alpha and gross beta in tap water

1.2 การคำนวณ

1.2.1 กัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟา (เบคเคอเรลต่อลิตร) = $\frac{(A-B) \times 100}{E \times V \times 60}$

1.2.2 กัมมันตภาพรังสีรวมบีตา (เบคเคอเรลต่อลิตร) = $\frac{(A-B) \times 100}{E \times V \times 60}$

เมื่อ A คือ อัตราการนับอนุภาคแอลฟาหรือรังสีบีตา (จำนวนนับต่อนาที)

B คือ อัตราการการนับของรังสีพื้นหลังของอนุภาคแอลฟาหรือรังสีบีตา (จำนวนนับต่อนาที)

E คือ ประสิทธิภาพของการวัดอนุภาคแอลฟาหรือรังสีบีตา (เปอร์เซ็นต์)

V คือ ปริมาตรตัวอย่าง (ลิตร)

1.2.3 ร้อยละประสิทธิภาพการวัดรังสีแอลฟาหรือบีตา (เปอร์เซ็นต์)

$$= \frac{\text{อัตราการนับรังสีแอลฟาหรือบีตาต่อนาที (count per minute)} \times 100}{\text{อัตราการสลายตัวต่อนาทีของสารรังสีมาตรฐานแอลฟาหรือบีตา (disintegration per minute)}}$$

1.2.4 ความไม่แน่นอนของการตรวจวัด

$$\text{Counting uncertainty (at 95 \% confidence)} = 1.96 \times [R_s/t_s + R_b/t_b]^{0.5}$$

เมื่อ R_s = อัตราการนับรังสีในตัวอย่าง (จำนวนนับต่อนาที)

R_b = อัตราการนับรังสีในแบลงค์ (จำนวนนับต่อนาที)

t_s = เวลาที่นับรังสีในตัวอย่าง (นาที)

t_b = เวลาที่นับรังสีพื้นหลัง (นาที)

1.2.5 ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด

$$\text{Detection Limit (DL at 95 \% confidence)} = 4.66 \times [cpm_b/t]^{0.5}$$

เมื่อ cpm_b = อัตราการนับของรังสีพื้นหลัง (จำนวนนับต่อนาที)

t = เวลานับของรังสีพื้นหลัง (นาที)

2. การควบคุมคุณภาพ

2.1 ควบคุมคุณภาพภายใน โดยวิธีการพลอตกราฟควบคุม (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) ของชุดข้อมูลซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ควรมีการควบคุมคุณภาพ (MARLAP, 2014) ดังต่อไปนี้

2.1.1 ตรวจวัดอัตราการนับต่อนาทีของกัมมันตภาพรังสีพื้นหลัง (gross alpha and gross beta background)

2.1.2 ตรวจสอบประสิทธิภาพของการวัดอนุภาคแอลฟา (alpha efficiency) โดยตรวจวัดอัตราการนับต่อนาทีของสารรังสีมาตรฐานอเมอริเชียม-241 (Am-241) และคำนวณผล

2.1.3 ตรวจสอบประสิทธิภาพของการวัดรังสีบีตา (beta efficiency) โดยตรวจวัดอัตราการนับต่อนาทีของสารรังสีมาตรฐานสทรอนเชียม-90/อิตเตียม-90 (Sr-90/Y-90) และคำนวณผล

2.1.4 นำข้อมูลที่ได้มาพลอตกราฟควบคุม Control Chart แบบ Mean Chart โดยคำนวณ ค่ากลาง (Mean), ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) , ระดับเตือนบนและล่าง (Upper and Lower Warning Line (UCL,UWL), Mean$\pm$ 2SD), ระดับควบคุมบนและล่าง (Upper and Lower Control Level, X $\pm$ 3SD)

2.2 ควบคุมคุณภาพภายนอก ได้เข้าร่วมในกิจกรรมเปรียบเทียบผลระหว่างห้องปฏิบัติการ (Inter-comparison laboratory) ของการตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในตัวอย่างน้ำประปา ภายใต้โปรแกรมทดสอบความชำนาญ จัดโดยทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557-2559 ดังนี้

2.2.1 IAEA-TEL-2014-04 ALMERA proficiency test on determination of anthropogenic radionuclides in water, seaweed and sediment samples

2.2.2 IAEA-TEL-2015-04 ALMERA proficiency test on determination of anthropogenic and natural radionuclides in water, rice and soil samples

2.2.3 IAEA-TEL-2016-04 ALMERA proficiency test on determination of anthropogenic and natural radionuclides in water, biota and sediment samples

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการควบคุมคุณภาพภายใน (Internal quality control)

จากการนำแผนภูมิควบคุมมาใช้ในการควบคุมคุณภาพภายในของวิธีการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในน้ำประปาโดยเครื่องวัดรังสีรวมแอลฟาและบีตาชนิดระดับรังสีพื้นหลังต่ำ ในปี พ.ศ. 2558 -. 2559 พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบอัตราการนับต่อนาทีของกัมมันตภาพรังสีพื้นหลังแอลฟาและบีตา (Figure 3, Figure 4) และการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบประสิทธิภาพการวัดอนุภาคแอลฟาและรังสีบีตา (Figure 5, Figure 6) มีการกระจายตัวอยู่ระหว่างเส้นค่ากลาง และไม่มีจุดใดๆของแผนภูมิอยู่นอกเส้นควบคุมบนและล่าง หรืออยู่นอกการควบคุม (out of control) แสดงให้เห็นว่า เครื่องวัดรังสีรวมแอลฟาและบีตาชนิดระดับรังสีพื้นหลังต่ำ มีสมรรถนะการทำงานที่เหมาะสมในช่วงเวลาดังกล่าว

Lopes et al. (2014) ได้นำแผนภูมิควบคุม มาใช้ในการตรวจสอบสอบอัตราการนับต่อนาทีของรังสีพื้นหลังบีตา และประสิทธิภาพรังสีบีตา เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพภายในของวิธีการตรวจวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีสทรอนเชียม-90 (Sr-90) ในตัวอย่างอาหาร โดยเครื่องวัดรังสีชนิด Liquid Scintillation Counter.

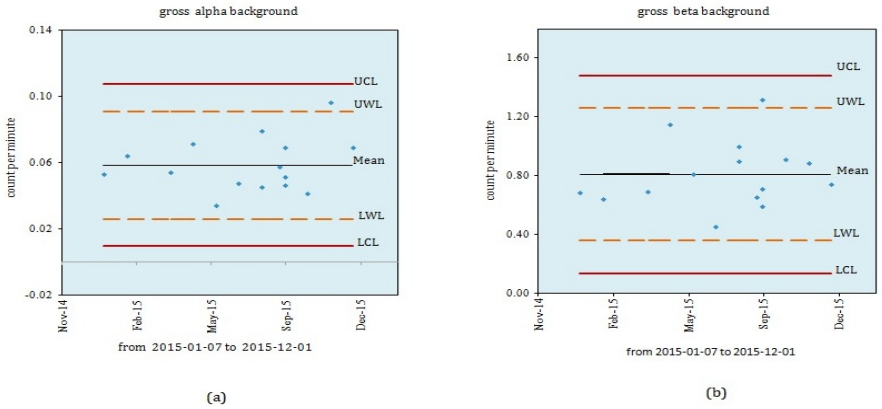


Figure 3 Background control chart in year 2015 (gross alpha (a); gross beta (b))

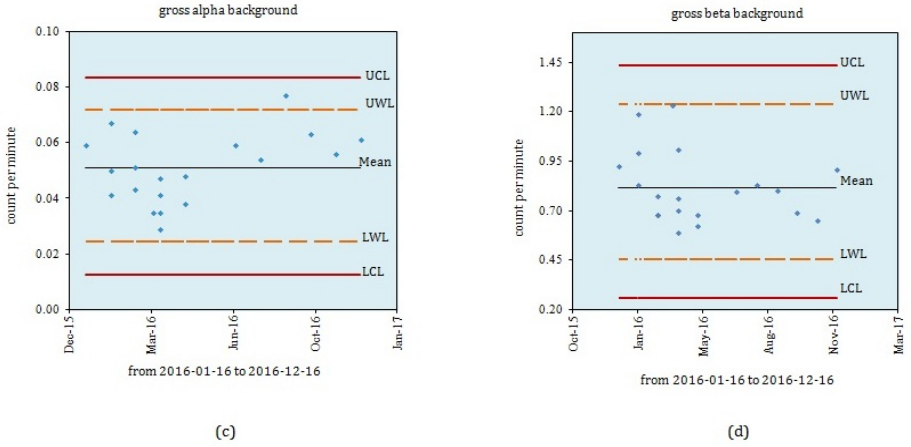


Figure 4 Background control chart in year 2016 (gross alpha (a); gross beta (b))

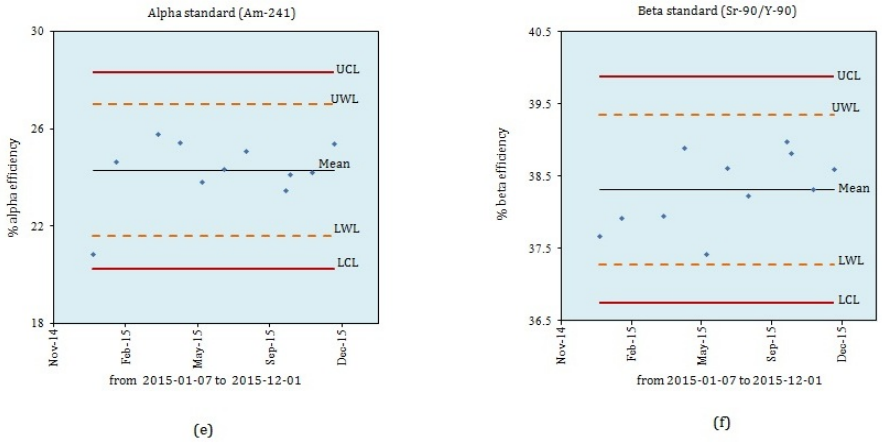


Figure 5 Efficiency of detection in year 2015 (alpha efficiency (e); beta efficiency (f))

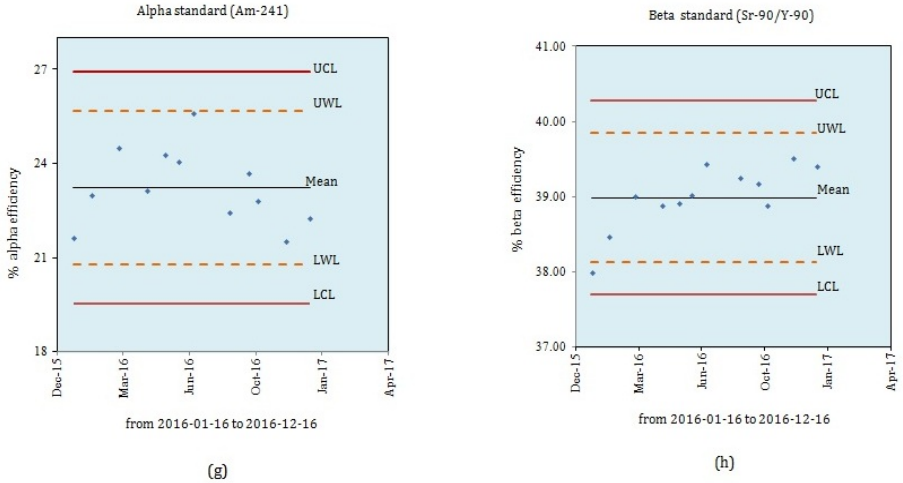


Figure 6 Efficiency of detection in year 2016 (alpha efficiency (g); beta efficiency (h))

ผลการควบคุมคุณภาพภายนอก (External quality control)

เมื่อทำการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในตัวอย่างน้ำประปาที่ได้รับจากการเข้าร่วมกิจกรรมทดสอบความชำนาญในปี พ.ศ. 2557-2559 ตามวิธีมาตรฐานของ EPA Method 900.0 นั้น ผลการ

ตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาที่ห้องปฏิบัติการกลุ่มเฝ้าตรวจกัมมันตภาพรังสีรายงานพร้อมค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (Report value ± uncertainty) เปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับหน่วยงานผู้จัด (Robust Mean ± Robust SD) และการประเมินผล (Robust Z-Score) ของการในแต่ละปี มีดังต่อไปนี้

การประเมินผลการตรวจวัดในปี 2557 พบว่า z-score ของการตรวจวัเกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาของ sample-01 มีค่าเท่ากับ -0.67 และ 0.7 ตามลำดับ และ z-score ของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาของ sample-02 มีค่าเท่ากับ -1.0 และ 0.88 ตามลำดับ และอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ (Table 1)

Table 1 Individual Evaluation Report for Radiation Monitoring Laboratory at OAP in 2014

Evaluation parameters[1/]	Sample-01 (Bq/L)		Sample-02 (Bq/L)	
	Gross Alpha	Gross Beta	Gross Alpha	Gross Beta
Robust Mean ± Robust SD	34 ± 13	101 ± 36	38 ± 16	37 ± 15
Report Value ± Uncertainty	25.34 ± 3.35	126.36 ± 5.66	22.00 ± 1.70	50.21 ± 2.13
Z-Score	-0.67	0.7	-1.0	0.88

การประเมินผลการตรวจวัดในปี 2558 พบว่าค่า z-score ของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมบีตาของ sample-01 มีค่าเท่ากับ -0.82 และการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมบีตาของ sample-02 มีค่า z-score เท่ากับ -0.23 และอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ (Table 2)

Table 2 Individual Evaluation Report for Radiation Monitoring Laboratory at OAP in 2015

Evaluation parameters[1/]	Sample-01 (Bq/L)		Sample-02 (Bq/L)	
	Gross Alpha	Gross Beta	Gross Alpha	Gross Beta
Robust Mean ± Robust SD	-	104 ± 13	-	51 ± 11
Report Value ± Uncertainty	-	93.36 ± 3.23	-	48.51 ± 2.55
Z-Score	-	-0.82	-	-0.23

การประเมินผลการตรวจวัดในปี 2559 พบว่า z-score ของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมบีตาของ sample-01 มีค่าเท่ากับ 0.30 และการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาของ sample-02 มีค่า z-score เท่ากับ -1.51 และ -0.86 ตามลำดับ และอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ (Table 3)

Table 3 Individual Evaluation Report for Radiation Monitoring Laboratory at OAP in 2016

Evaluation parameters[1/]	Sample-01 (Bq/L)		Sample-02 (Bq/L)	
	Gross Alpha	Gross Beta	Gross Alpha	Gross Beta
Robust Mean ± Robust SD	-	106 ± 20	58 ± 15	58 ± 17
Report Value ± Uncertainty	-	112.09 ± 3.59	40.82 ± 2.36	43.32 ± 2.84
Z-Score	-	0.30	-1.15	-0.86

1/ Calculation of Evaluation Parameter

Robust average (X*) = Median of xi [i=1,2,3..p]

Robust Standard Deviation: S* = 1.483* Median of [xi-x*]

Z-Score: Z = [Reported value – Target value] / S*

Z-Score Evaluation : Z<2 : acceptable, 2≤Z≤3 : warning, Z>3 : not acceptable

สรุป

ผลการประเมินสมรรถนะของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในน้ำประปา ด้วยสถิติ Robust Z-Score ในปี 2557 พบว่า ค่า z-score ของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาของ sample-01 มีค่าเท่ากับ -0.67 และ 0.7 ตามลำดับ ค่า z-score ของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาของ sample-02 มีค่าเท่ากับ -0.67 และ 0.7 ตามลำดับ ในปี 2558 พบว่า ค่า z-score ของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมบีตาของ sample-01 และ sample-02 มีค่าเท่ากับ -0.82 และ -0.237 ตามลำดับ และในปี 2559 พบว่า ค่า z-score ของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมบีตาของ sample-01 มีค่าเท่ากับ 0.30 และค่า z-score ของการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาของ sample-02 มีค่าเท่ากับ -1.51 และ -0.86 ตามลำดับ ดังนั้นการประเมินสมรรถนะในการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในน้ำประปาห้องปฏิบัติการกลุ่มเฝ้าตรวจกัมมันตภาพรังสีอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ (z-score<2) สรุปได้ว่า ห้องปฏิบัติการกลุ่มเฝ้าตรวจกัมมันตภาพรังสี มีศักยภาพในด้านการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีรวมแอลฟาและบีตาในน้ำประปา และเป็นที่ยอมรับในระดับสากล

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณกัลยา ช่างเครื่อง กลุ่มพัฒนาด้านความมั่นคงและการพิทักษ์ความปลอดภัย สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ในการรวบรวมเอกสารเพื่อขออนุมัติและสนับสนุนทุนในการตีพิมพ์ผลงานในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ 2547. **คู่มือการควบคุมและประกันคุณภาพงานห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม**, กรุงเทพฯ.

Kriger, H.L and Whittaker, E.L. 1980. **Method 900.0 : Gross Alpha and Gross Beta Radioactivity in Drinking Water**. EPA 600/4-8-032, Environmental Monitoring and Support Laboratory, Office of Research and Development. Cincinati, Ohio. USA.

Lopes, I., A. Mourato, J. Abrantes, G. Carvalhal, M.J. Madruga and M. Reis. 2014. Quality control assurance of strontium-90 in foodstuffs by LSC. **Applied Radiation and Isotopes** 93: 29-32.

Multi-Agency Radiological Laboratory Analytical Protocals Manual (MARLAP). 2004. Manual Volume III:Laboratory Quality Control (Online). www.epa.gov, July 29, 2017.

World Health Organization. 2011. **Guidelines for Drinking-water Quality** Fourth Edition Radiological aspects, Switzerland.

การถอดความและทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของตำรับยาโบราณที่จารึกไว้ในคัมภีร์ใบลาน

Translation and Antioxidant Activity of the Drug Ancient Texts from Scripture Inscribed on Bai Lan

ศรัญญา มณีทอง[1*] สุพัทรา แตงทับทิม[1] และ พิพัฒน์ ประเสริฐสังข์[2]

Sarunya Maneetong[1*], Supattra Tangtubtim[1] and Phiphat Prasertsang[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อถอดความตำรายาโบราณจากอักษรธรรมอีสานเป็นอักษรไทยปัจจุบัน และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสมุนไพร 29 ชนิด ในตำรับยา 5 ตำรับ พร้อมตรวจสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในสูตรยาแต่ละตำรับด้วยวิธี DPPH ABTS และ FRAP โดยแต่ละตำรับมีขั้นตอนการสกัดสมุนไพรที่แตกต่างกัน ดังนี้ ยาแก้ไข้ (การฝนสกัด) ยาแก้ผื่น (การฝนสกัด) ยาแก้อาการผิดสำแดง (การฝนสกัด) ยานิ่วเลือด (การต้มสกัด) และยาแก้วิงเวียน (การแช่สกัด) ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมพบว่า G1-20-0.5, G2-20-0.3, G3-30-0.3, D1-10-0.1-20-80 และ S1-80-1.0-10 ได้สารสกัดสมุนไพรที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด และหาค่า IC_{50} ได้เท่ากับ 5.63, 86.90, 26.10, 8.80 และ 63.31 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ จากผลการทดสอบทั้ง 3 วิธี แสดงให้เห็นว่าตำรับยาโบราณทั้ง 5 ตำรับ มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้อาจใช้เป็นแนวทางในการค้นหาสมุนไพรที่มีผลต่อการรักษาโรคและสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลด้านสมุนไพรไทยได้

ABSTRACT

This research aims to translation the drug ancient texts from Toom-Isan script to Thai alphabet and study the optimal conditions for extraction of 29 herbal samples in 5 formulations to examine the antioxidant properties of each formulation by DPPH, ABTS and FRAP methods. Each formulation has different herbal extraction procedures such as Antipyretics (Rubbing extracted), Antipruritic (Rubbing extracted), Antidote (Rubbing extracted), Gallstones (Boiling extracted) and Cure Vertigo (Infusion extracted). The results showed that the appropriate conditions for highest antioxidant activity as follow G1-20-0.5, G2-30-0.3, G3-30-0.3, D1-10-0.1-20-80 and S1-80-1.0-10. The IC_{50} of antioxidant activity test showed 5.63, 86.90, 26.10, 8.80 and 63.31 g/kg, respectively. The results of the 3 methods showed that the all drug ancient texts has the ability to antioxidant activity. The results of this study may be used as a guide to finding herbs that affect the treatment of diseases and can be used as a Thai herbal database.

Key Word: translation, antioxidant activity, drug ancient texts, Bai Lan

* Correspondion auther; e-mail address: Sarunya_0401@hotmail.com

[1] สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ บุรีรัมย์ 31000

[2] สาขาวิชาภาษาไทย คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ บุรีรัมย์ 31000

[1] Department of Chemistry, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University, Buriram 31000

[2] Department of Thai Language, Faculty of Humanities and Social Sciences, Buriram Rajabhat University, Buriram 31000

คำนำ

เอกสารใบลานเป็นเอกสารชั้นต้นที่มีความสำคัญต่อวงวิชาการเป็นอย่างมาก เพราะในอดีตการบันทึกความรู้ ความคิด ประเพณี วิถีชีวิต และตำรายาของผู้คนในท้องถิ่น จะบันทึกในรูปของตัวอักษรโบราณที่ชุมชนนั้นเขียนถ่ายทอดในชุมชน ได้แก่ อักษรปัลลวะ อักษรขอม อักษรธรรม อักษรไทยน้อย ทำให้สามารถจำแนกสาระความรู้ที่บันทึกในเอกสารใบลานได้หลายหมวดหมู่อาทิ เช่น วรรณกรรมนิทาน พงศาวดาร (เอกวิทย์, 2544) และตำรายา (สมบัติ และคณะ, 2546; สุดารัตน์, 2548) อย่างไรก็ตามอักษรที่ใช้ในการจารึกเป็นอักษรโบราณ หากต้องใช้บุคคลที่มีความรู้เรื่องอักษรโบราณมาช่วยในการแปลให้เป็นภาษาไทยปัจจุบัน ซึ่งการถอดความ (การปริวรรต) ตำรับยาโบราณ เป็นการถอดความตัวอักษรโบราณจากเอกสารใบลาน โดยใช้วิธีการถอดความครั้งเดียว ซึ่งเป็นการถอดความแบบผสมผสาน ระหว่างการถอดความจากต้นฉบับเดิมและความเหมาะสมบางประการสำหรับการบันทึกเป็นภาษาไทยปัจจุบัน เพื่อให้คนทั่วไปสามารถอ่านเข้าใจได้ (ชวนากร, 2552)

ตำรับยาโบราณเป็นการนำพืชสมุนไพรหลายๆ ชนิดมาปรุงเป็นยาเพื่อรักษาโรคหรืออาการต่างๆ โดยใช้คุณสมบัติทางยาของพืชแต่ละชนิดมารวมกัน ซึ่งถือเป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นที่ปราชญ์ชาวบ้านได้เป็นผู้คิดค้นขึ้นเพื่อใช้รักษาอาการเจ็บป่วยของคนในชุมชน สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการถอดความเอกสารใบลานนั้น ส่วนใหญ่เป็นการถอดความเอกสารใบลานและจัดทำเป็นตำรายาเพื่อรวบรวมตำรับยาที่ถอดความได้ ตัวอย่างเช่น ตำรายาวัดท่าม่วง อำเภอเสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด (ชวนากร, 2552) การศึกษาเกี่ยวกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในตำรับยาโบราณที่ได้จากการถอดความนั้นยังไม่พบการรายงานผลการศึกษา ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในพืช ได้แก่ เหง้าข่าลิง (นพวัฒน์ และคณะ, 2554) สาหร่ายทะเล แบคทีเรีย เชื้อรา และพืชชั้นสูง (Chattopadhyay *et al*., 2008) โดยสารต้านอนุมูลอิสระเป็นสารประกอบที่ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในเซลล์ บทบาทสำคัญของสารต้านอนุมูลอิสระคือ ป้องกันการเกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสาเหตุหลักของการเสื่อมคุณภาพของเซลล์ส่งผลให้ร่างกายเกิดอาการเจ็บป่วยหรือเป็นโรคร้ายต่างๆ โดยเฉพาะโรคมะเร็ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะทำการถอดความเอกสารใบลานที่จารึกเป็นอักษรธรรมหรืออักษรไทยน้อยให้เป็นอักษรไทยปัจจุบัน เพื่อค้นหาตำรับยาโบราณที่ใช้ในการรักษาโรคต่างๆ ของคนในสมัยโบราณและศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของยาในแต่ละตำรับด้วยวิธี DPPH radical scavenging assay, ABTS radical scavenging assay และ Ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) assay พร้อมทั้งหาค่า 50% Inhibitory Concentration (IC_{50}) โดยผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้อาจใช้เป็นแนวทางในการค้นหาสมุนไพรที่มีผลต่อการรักษาโรคและสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลด้านสมุนไพรไทยให้กับหน่วยงานแพทย์แผนไทยเพื่อนำสมุนไพรมาประยุกต์ใช้ในการรักษาโรคของคนในปัจจุบันได้

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การถอดความและจัดระบบตำรับยาโบราณจากอักษรโบราณเป็นภาษาไทยปัจจุบัน

ได้ถอดความและจัดระบบเอกสารใบลานสั้นในหมวดหมู่ของตำรายาจำนวน 48 หน้าลาน โดยตัวอักษรที่จารึกในใบลานเป็นอักษรธรรมอีสาน จากการถอดความและจัดระบบเอกสารใบลาน พบว่าตัวยาบางชนิดนั้นหายากหรือบางชนิดหมอยาแผนโบราณไม่นิยมใช้ในการปรุงยา ดังนั้นจึงได้คัดเลือกตำรับยาที่สมุนไพรสามารถหาได้มา 5 ตำรับ แต่ละตำรับมีวิธีการสกัดสมุนไพรที่แตกต่างกัน ได้แก่ ยาแก้ไข้ (Antipyretics) (การฝนสกัด),

ยาแก้ผื่น (Antipruritic) (การฝนสกัด), ยาแก้อาการผิดสำแดง (Antidote) (การฝนสกัด), ยานิ่วเลือด (Gallstones) (การต้มสกัด) และยาแก้วิงเวียน (Cure Vertigo) (การแช่สกัด) ดังแสดงใน Figure 1 เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยดังต่อไปนี้

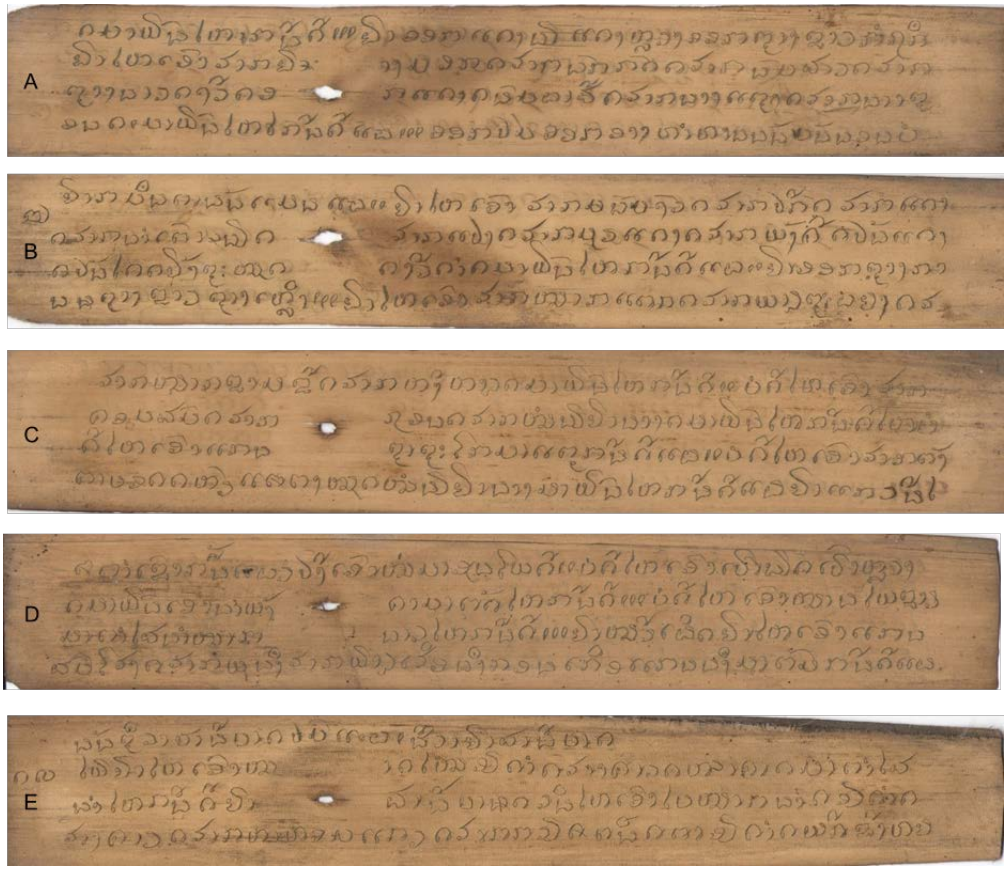


Figure 1 Drug formula in the drug ancient texts from scripture inscribed in Medicine for Antipyretics (A), Antipruritic (B), Antidote (C), Gallstones (D) and Cure Vertigo (E)

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสมุนไพรในตำรับยาเพื่อให้ได้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด

มีสมุนไพรทั้งหมด 29 ชนิด สำหรับการปรุงยาทั้ง 5 ตำรับ ได้แก่ ยาแก้ไข้ (G1) ประกอบด้วยสมุนไพร ได้แก่ รากหมอน้อย ฝาง และไคร้หอม ยาแก้ผื่น (G2) ประกอบด้วยสมุนไพร ได้แก่ รากนมวัว รากจิก รากรางแดง รากน้ำเต้า รากแสง รากมุยแดง รากพังคี จันทน์แดง จันทน์ขาว กางของ และงิ้วดำ ยาแก้อาการผิดสำแดง (G3) ประกอบด้วยสุมนไพร ได้แก่ ถ่อน ย่านาง หมอน้อย รากคอม และฝ้ายป่า ยานิ่วเลือด (D1) ประกอบด้วยสุมนไพร ได้แก่ ส้มโฮง รากพลู รากฝ้ายป่า และเกลือ และยาแก้วิงเวียน (S1) ประกอบด้วยสุมนไพร ได้แก่ ใบน้ำเต้า อ้อยดำ ฮางคาว รากกล้วยตีบ ขิง กระเทียม และพริกไทย และหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสมุนไพรโดยทำการศึกษาผลของปริมาณสมุนไพร ปริมาตรน้ำ ระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดสมุนไพร ดังนี้ การฝนสกัด (นำสมุนไพรมาฝนกับหินฝนยาและละลายด้วยน้ำ) ศึกษาผลของปริมาณสมุนไพรที่ใช้ฝน 0.1, 0.3 และ 0.5 กรัมต่อปริมาตรน้ำ 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร การแช่สกัด (แช่สมุนไพรในน้ำ) ศึกษาผลของปริมาณสมุนไพรที่ใช้แช่ 1 กรัมต่อปริมาตรน้ำ 40, 60 และ 80 มิลลิลิตร เวลาที่แช่ 10, 20 และ 30 นาที การต้มสกัด (ต้มสมุนไพรกับ

น้ำ) ศึกษาผลของปริมาณสมุนไพรที่ใช้ต้ม 0.1 กรัมต่อปริมาตรน้ำ 10 20 และ 30 มิลลิลิตร เวลาที่ใช้ในการต้ม 10, 20 และ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส (ทำการทดลองสิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ)

โดยในการทดลองได้ใช้รหัสในการทดลองดังนี้ XI-a-b-c-d แปลความหมายได้ว่า X = ตำรับยา โดย S = ตำรับการแช่สกัด, G = ตำรับการฝนสกัด, D = ตำรับการต้มสกัด; I = ตำรับยาชุดที่ โดย 1 = ชุดที่ 1, 2 = ชุดที่ 2, 3 = ชุดที่ 3; a = ปริมาตรน้ำ, b = ปริมาณยา, c = ระยะเวลาสกัด, d = อุณหภูมิ

การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของตำรับยาโบราณที่ได้จากการถอดความเอกสารใบลาน

ศึกษาผลของสภาวะที่เหมาะสมในการปรุงยาที่มีผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยนำสารสกัดสมุนไพรที่ได้จากการปรุงในแต่ละสภาวะมาทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ABTS และ FRAP ดังนี้ วิธี DPPH ทดสอบโดยนำสารสกัด 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย 80 ไมโครโมลาร์ DPPH 4.5 มิลลิลิตร (หลอดควบคุมใช้ตัวทำละลายที่ใช้สกัดตัวอย่าง 0.5 มิลลิลิตร) หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร วิธี ABTS ทดสอบโดยนำสารสกัด 100 ไมโครลิตร ผสมกับ 70 เปอร์เซ็นต์เอทานอล 100 ไมโครลิตร และ สารละลาย 7 มิลลิโมลาร์ ABTS 10 มิลลิลิตร (หลอดควบคุมใช้ตัวทำละลายที่ใช้สกัดตัวอย่าง 100 ไมโครลิตร) หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 6 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร วิธี FRAP ทดสอบโดยนำสารสกัด 100 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย FRAP 5.4 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 596 นาโนเมตร นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ Inhibition และความสามารถในการให้อิเล็กตรอนสำหรับวิธี FRAP ในสูตรยาแต่ละตำรับเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรุงยา และเลือกสภาวะที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ Inhibition และความสามารถในการให้อิเล็กตรอนสำหรับวิธี FRAP สูงสุดไปหาค่า IC_{50}

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสมุนไพรในตำรับยาเพื่อให้ได้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสมุนไพร 29 ชนิด ในตำรับยาที่ได้จากการถอดความทั้ง 5 ตำรับ ได้แก่ ยาแก้ไข้ (G1) ยาแก้ผื่น (G2) ยาแก้อาการผิดสำแดง (G3) ยานิ่วเลือด (D1) และยาแก้วิงเวียน (S1) โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสมุนไพรแต่ละตำรับให้ได้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง (Table 1) คือ ยาแก้ไข้ (G1-20-0.5) ยาแก้ผื่น (G2-20-0.3) ยาแก้อาการผิดสำแดง (G3-30-0.3) ยานิ่วเลือด (D1-10-0.1-20-80) และ ยาแก้วิงเวียน (S1-80-1.0-10) ซึ่งรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการสกัดสมุนไพรจากตำรับยาโบราณที่ได้จากการถอดความเอกสารใบลานนั้นมีข้อมูลอยู่น้อยมาก เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสกัดและทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในสมุนไพรหรือผักท้องถิ่นที่นิยมในปัจจุบัน โดยจากรายงานผลการวิจัยของสุชาดา (2558) พบว่าสารสกัดสมุนไพร 46 ชนิด ในตำรับยาหอมเทพจิตรที่สกัดโดยนำผงสมุนไพร 100 กรัม แช่ในเอทานอล 500 มิลลิลิตร เป็นระยะเวลา 3 วัน ตรวจสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH ABTS และ FRAP สารสกัดจากสมุนไพรทั้ง 46 ชนิด มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และในรายงานผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าในความเป็นจริง เซลล์ในร่างกายของมนุษย์อยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำหรือมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยน้ำเพราะฉะนั้นควรมีการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในตัวกลางที่เป็นน้ำด้วยซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยนี้ นอกจากนั้นยังมีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการสกัดและทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในสมุนไพร

ของระวิวรรณ (2549) พบว่าสารสกัดสมุนไพร 8 ชนิด ได้แก่ เหียง กระบก แมงลักคา หูเสือ เอนอ้า มะพอก มะสัง และตูมกาขาว ด้วยการนำส่วนต่างๆ ของพืชมาสกัดโดยใช้ตัวทำละลายเอธิลอะซิเตทและเอทานอล จากนั้นทดสอบฤทธิ์อนุมูลอิสระโดยใช้วิธี DPPH พบว่าสารสกัดชั้น เอทานอล แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้สูงกว่าสารสกัดในชั้นเอธิลอะซิเตท รายงานผลการวิจัยของ Carabajal *et al*. (2017) พบว่าการสกัดสารจากสมุนไพรท้องถิ่นที่ใช้เป็นยาแผนโบราณในประเทศอาเจนตินา โดยใช้ ไดเมธิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) เป็นตัวทำละลายนั้น สารสกัดสมุนไพรที่ได้มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ และรายงานผลการวิจัยของ Said Al-Muniri and Hossain (2017) พบว่าการสกัดสารจากพืชสมุนไพรในประเทศโอมานด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกันมีผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยเรียงลำดับจากสูงไปหาต่ำดังนี้ เอธิลอะซิเตท บิวทานอล น้ำ คลอโรฟอร์ม เฮกเซน และเมทานอล ตามลำดับ จากรายงานการวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดสมุนไพรแสดงให้เห็นว่ารายงานการวิจัยส่วนใหญ่ใช้ตัวทำละลายเป็น เอทานอล (Heras *et al*., 1998; Twilley *et al*., 2017) เมทานอล และน้ำ (Sabir *et al*., 2017) ซึ่งในร่างกายของมนุษย์นั้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำ ดังนั้นหากต้องใช้สารสกัดจากสมุนไพรในการรักษาโรคหรือต้านอนุมูลอิสระในร่างกายควรใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำถึงแม้ว่าจะได้สารสกัดที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระต่ำกว่าตัวทำละลายที่เป็นเอทานอลหรือเมทานอล แต่น้ำไม่ส่งผลต่อระบบการทำงานของเซลล์ในร่างกายมนุษย์

ผลการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของตำรับยาโบราณที่ได้จากการถอดความเอกสารใบลาน

จากการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของตำรับยาโบราณที่ได้จากการถอดความเอกสารใบลานด้วยวิธี DPPH และ ABTS เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Trolox พบว่า สารสกัดสมุนไพรทั้ง 5 ตำรับ ที่เตรียมในสภาวะที่เหมาะสมมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้สูงและให้ผลการทดลองสอดคล้องกันทั้งสองวิธี โดย ยาแก้ไข้ (G1) ยาแก้ผื่น (G2) ยาแก้อาการผิดสำแดง (G3) ยานิ่วเลือด (D1) และยาแก้วิงเวียน (S1) มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (%Inhibition) เท่ากับ 73.24 ± 2.13, 88.90 ± 3.73, 79.20 ± 1.46, 77.14 ± 4.40 และ 69.23 ± 3.14 ตามลำดับ ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS (%Inhibition) เท่ากับ 90.04 ± 2.94, 91.12 ± 1.65, 88.40 ± 1.62, 85.67 ± 2.23 และ 67.98 ± 0.30 ตามลำดับ สำหรับผลการทดสอบความสามารถในการให้อิเล็กตรอนด้วยวิธี FRAP ของสารสกัดสมุนไพรทั้ง 5 ตำรับ พบว่า ตำรับยาโบราณทั้ง 5 ตำรับ มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ ซึ่งมีค่า FRAP value เท่ากับ 2.01 ± 0.43, 2.89 ± 0.99, 1.91 ± 0.72, 3.04 ± 0.32 และ 1.02 ± 0.15 mM Fe^{2+}/g ตามลำดับ และมีค่า IC_{50} เท่ากับ 5.63, 86.90, 26.10, 8.80 และ 63.31 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (IC_{50}) กับสารมาตรฐาน Trolox (0.04 กรัมต่อกิโลกรัม) พบว่าสารสกัดสมุนไพรทุกตำรับมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระน้อยกว่าสารมาตรฐาน Trolox อย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าสารสกัดสมุนไพรทุกตำรับจะให้ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระต่ำกว่าสารมาตรฐาน Trolox แต่สารสกัดสมุนไพรเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติไม่ได้เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการดังนั้นเมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน Trolox แล้วถือได้ว่ามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้สูง ซึ่งจากผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระทั้ง 3 วิธี (Table 1) พบว่าตำรับยาโบราณที่ได้จากการถอดความเอกสารใบลานทั้ง 5 ตำรับ มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สำหรับรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในตำรับยาโบราณที่ได้จากการถอดความเอกสารใบลานนั้นยังมีข้อมูลอยู่จำกัดมากเพราะสมุนไพรที่ใช้ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นยาในสมัยโบราณ และจากรายงานการวิจัยส่วนใหญ่เป็นการรวบรวมข้อมูลจากการถอดความและจัดระบบในรูปแบบของตำรายาเท่านั้น (สมบัติ และคณะ, 2546; สุดารัตน์, 2548, ชวนากร, 2552) โดยรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในสมุนไพรส่วนใหญ่

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับสมุนไพรท้องถิ่นที่มีฤทธิ์ทางยาดังเช่น รายงานการวิจัยของสุชาดา (2558) พบว่าสารสกัดสมุนไพร 46 ชนิด ในตำรับยาหอมเทพจิตรเมื่อทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH ABTS และ FRAP สารสกัดจากสมุนไพรทั้ง 46 ชนิด มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ รายงานการวิจัยของ Heras *et al*., (1998) ได้ศึกษาเกี่ยวกับพืชสมุนไพรที่ใช้เป็นยาแผนโบราณในประเทศเอกวาดอร์ พบว่าพืชที่ใช้เป็นส่วนประกอบในยาแผนโบราณ 3 ชนิด คือ *Baccharis trinervis*, *E. articulatum* และ *Phytolacca rivinoides* มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้สูง นอกจากนี้มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสมุนไพรในยาแผนโบราณ ตัวอย่างเช่น *Baccharis trimera* (Sabir *et al*., 2017), *Hapllophyllum tuberculatum* (Said Al-Muniri and Hossain, 2017), *Acacia mellifera*, *Gomphocarpus fruticosus*, *Helichrysum kraussii* และ *Syzygium jambos* (Twilley *et al*., 2017) จากรายงานเกี่ยวกับการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสมุนไพรแสดงให้เห็นว่าสมุนไพรที่มีการนำมาใช้ในยาแผนโบราณทั้งในประเทศและต่างประเทศนั้นล้วนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย

Table 1 Extraction condition and antioxidant activity of the drug ancient texts and assessed with the DPPH, ABTS and FRAP methods

Drug Ancient Texts	Inhibition (%) ± SD		FRAP assay
	DPPH assay	ABTS assay	mM Fe^{2+} /g ± SD
G1-10-0.1	10.33 ± 2.43^{a}	23.64 ± 3.49^{a}	0.35 ± 0.06^{a}
G1-20-0.1	34.86 ± 2.17^{b}	27.29 ± 3.55^{a}	0.72 ± 0.14^{a}
G1-30-0.1	34.07 ± 4.57^{b}	40.26 ± 5.88^{b}	0.88 ± 0.12$^{a, b}$
G1-10-0.3	64.51 ± 4.12^{c}	63.80 ± 2.55^{c}	1.59 ± 0.02^{b}
G1-20-0.3	66.95 ± 2.85^{c}	78.80 ± 2.03^{d}	2.63 ± 0.22^{c}
G1-30-0.3	68.53 ± 1.53$^{c, d}$	59.38 ± 1.11^{c}	2.69 ± 0.10^{c}
G1-10-0.5	65.57 ± 4.74^{c}	81.90 ± 3.56^{d}	2.76 ± 0.16^{c}
G1-20-0.5	73.24 ± 2.13$^{c, d, A, B}$	90.04 ± 2.94$^{e, B, C}$	2.25 ± 0.10$^{c, B}$
G1-30-0.5	76.18 ± 1.62^{d}	83.88 ± 3.68^{d}	1.35 ± 0.10^{b}
G2-10-0.1	51.43 ± 2.54^{a}	58.60 ± 1.01^{a}	1.50 ± 0.11^{a}
G2-20-0.1	53.52 ± 1.83^{a}	69.70 ± 6.69^{b}	1.22 ± 0.20^{a}
G2-30-0.1	56.53 ± 0.20^{a}	63.97 ± 6.38$^{a, b}$	1.18 ± 0.02^{a}
G2-10-0.3	66.71 ± 1.22^{b}	65.38 ± 1.01^{b}	2.75 ± 0.47^{b}
G2-20-0.3	88.90 ± 3.73$^{c, C}$	91.12 ± 1.65$^{c, C}$	2.92 ± 0.14$^{b, C}$
G2-30-0.3	83.36 ± 1.01^{c}	89.40 ± 1.60^{c}	2.91 ± 0.44^{b}
G2-10-0.5	82.78 ± 1.83^{c}	90.69 ± 1.55^{c}	4.76 ± 0.33^{d}
G2-20-0.5	84.58 ± 0.91^{c}	90.50 ± 0.98^{c}	3.63 ± 0.69^{c}
G2-30-0.5	84.84 ± 0.50^{c}	90.40 ± 0.57^{c}	3.81 ± 0.55^{c}
G3-10-0.1	12.82 ± 2.32^{a}	38.35 ± 1.09^{a}	1.59 ± 0.09^{a}
G3-20-0.1	64.06 ± 2.13^{b}	50.33 ± 2.36^{b}	1.47 ± 0.26^{a}
G3-30-0.1	67.22 ± 2.94$^{b, c}$	53.33 ± 1.79^{b}	1.40 ± 0.27^{a}
G3-10-0.3	68.36 ± 4.36$^{b, c}$	65.59 ± 3.55^{c}	2.88 ± 0.01$^{b, c}$
G3-20-0.3	69.78 ± 0.68$^{b, c}$	70.13 ± 0.71^{c}	2.74 ± 0.71$^{b, c}$
G3-30-0.3	79.20 ± 1.46$^{d, B}$	88.40 ± 1.62$^{d, B}$	2.41 ± 1.19$^{b, B, C}$
G3-10-0.5	70.64 ± 3.30$^{b, c}$	82.52 ± 1.22^{d}	3.17 ± 0.16^{c}

Table 1 Extraction condition and antioxidant activity of the drug ancient texts and assessed with the DPPH, ABTS and FRAP methods (cont.)

Drug Ancient Texts	Inhibition (%) ± SD		FRAP assay
	DPPH assay	ABTS assay	mM Fe^{2+}/g ± SD
G3-20-0.5	71.35 ± 2.63$^{b, c}$	82.04 ± 0.65^{d}	3.70 ±0.08$^{c, d}$
G3-30-0.5	72.02 ± 0.86$^{b, c}$	84.77 ± 0.50^{d}	4.17 ± 0.43^{d}
D1-10-0.1-10-80	65.35 ± 5.78$^{b, c}$	45.70 ± 2.43$^{b, c}$	1.63 ± 0.43^{b}
D1-10-0.1-20-80	77.14 ± 4.40$^{d, B}$	85.67 ± 2.23$^{e, B}$	2.70 ± 0.22$^{c, B, C}$
D1-10-0.1-30-80	65.78 ± 4.36$^{b, c}$	64.97 ± 4.15^{d}	2.10 ± 0.77$^{b, c}$
D1-20-0.1-10-80	61.12 ± 2.03^{b}	46.94 ± 5.42$^{b, c}$	1.33 ± 0.26$^{a, b}$
D1-20-0.1-20-80	68.39 ± 7.13^{c}	60.79 ± 2.71^{d}	1.39 ± 0.22$^{a, b}$
D1-20-0.1-30-80	67.86 ± 2.03$^{b, c}$	51.29 ± 5.07^{c}	1.93 ± 0.32^{b}
D1-30-0.1-10-80	50.84 ± 6.16^{a}	39.83 ± 14.18$^{a, b}$	1.05 ± 0.34^{a}
D1-30-0.1-20-80	55.14 ± 1.11$^{a, b}$	39.59 ± 5.97$^{a, b}$	1.04 ± 0.03^{a}
D1-30-0.1-30-80	51.60 ± 5.54^{a}	35.24 ± 6.86^{a}	1.90 ± 0.25^{b}
S1-40-1.0-10	27.91 ± 0.30^{a}	49.57 ± 4.55^{a}	2.44 ± 0.26^{b}
S1-60-1.0-10	48.85 ± 1.52^{b}	54.01 ± 5.67^{a}	1.80 ± 0.19^{b}
S1-80-1.0-10	69.23 ± 3.14$^{c, A}$	67.98 ± 0.30$^{b, A}$	1.15 ± 0.33$^{a, A}$

$^{a, b, c}$ The difference was significant in column and compared within the drug ancient text ($p < 0.05$)

$^{A, B, C}$ The difference was significant in column and compared between the drug ancient text ($p < 0.05$)

สรุป

ตำรับยาโบราณที่ได้จากการถอดความเอกสารใบลานทั้ง 5 ตำรับ เมื่อทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ABTS และ FRAP แสดงให้เห็นว่าสารสกัดสมุนไพรแต่ละตำรับมีกลไกการต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกันไป โดยวิธี DPPH สารสกัดสมุนไพรที่ให้ไฮโดรเจนอะตอมในการกำจัดอนุมูลอิสระได้ดีคือ ตำรับยาแก้ผื่น วิธี ABTS สารสกัดสมุนไพรที่กำจัดอนุมูลอิสระชนิดเปอร์ออกซีได้ดีคือ ตำรับยาแก้ไข้ และตำรับยาแก้ผื่น และวิธี FRAP สารสกัดสมุนไพรสามารถให้อิเล็กตรอนได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากผลการทดสอบตำรับยาโบราณทั้ง 5 ตำรับชี้ให้เห็นว่าทุกตำรับมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ ดังนั้นเพื่อพัฒนาสารสกัดสมุนไพรแต่ละตำรับมาใช้เป็นยาในการรักษาโรคควรมีการศึกษาต่อยอดเพื่อให้ทราบถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสมุนไพรแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบในตำรับยาทั้ง 5 ตำรับ และสารสำคัญที่ออกฤทธิ์เป็นสารชนิดใด พร้อมทั้งศึกษากลไกการออกฤทธิ์ รวมถึงความปลอดภัยในการใช้ยาสมุนไพรแต่ละตำรับทั้งในหลอดทดลองและสัตว์ทดลองต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวัดอิสานทะเมนชัย ตำบลทะเมนชัย อำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์ สำนักศิลปะและวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนทุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ชวนากร จันนาเวช. 2552. **ตำรายาวัดท่าม่วง อำเภอเสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด**. มหาสารคาม : มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

นพวัฒน์ เพ็งคำศรี, จัตุพล กันทะมูล, ภัทราภรณ์ โตวัฒนกิจ, วชิรวิทย์ วงศ์ษารัฐ, วนิดา ใจหมั่น, นิภาพร เมืองจันทร์ และ ภารัตน์ จันทร์เหลือง. 2554. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเหง้าข่าลิง. **ไทยเภสัชศาสตร์และวิทยาการสุขภาพ**. 195-201

ระวิวรรณ แก้วอมตวงศ์ และ ทรงพร จึงมั่นคง. 2549. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และปริมาณสารฟีนอลรวมของสารสกัดพืชสมุนไพรไทยบางชนิด. **วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี** ปีที่ 8 (2): 77-88.

สมบัติ ประภาวิชา และคณะ. 2546. รายงานการวิจัยเรื่อง **การศึกษาตำรายาพื้นบ้านอีสาน**. มหาสารคาม : สถาบันวิจัยวลัยรุกขเวช มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

สุชาดา มานอก และ ปวีณา ลิ้มเจริญ. 2558. การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดสมุนไพรในตำรับยาหอมเทพจิตร. **ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์** ปีที่ 15 (ฉบับที่ 1): 106-117.

สุดารัตน์ ตัณฑะอาริยะ. 2548. **การศึกษาวิเคราะห์ตำรายาแผนโบราณจากสมุดไทยของจังหวัดพังงา**. วิทยานิพนธ์ อักษรศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภาษาไทย บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.

เอกวิทย์ ณ ถลาง. 2544. **ภูมิปัญญาอีสาน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. : อัมรินทร์, กรุงเทพ ฯใ

Carabajal, M.P.A, M.I. Isla and I.C. Zampini. 2017. Evaluation of antioxidant and antimutagenic activity of herbal teas from native plants used in traditional medicine in Argentina. **South African Journal of Botany** 110: 258-265.

Chattopadhyay, K. and B. D. Chattopadhyay. 2008. Effect of nicotine on lipid profile, peroxidation & antioxidant enzymes in female rats with restricted dietary protein. **Indian Journal of Medical Research** 127: 571-576.

Heras, B. de las, K. Slowing, J. Benedi, E. Carretero, T. Ortega, C. Toledo, P. Bermejo, I. Iglesias, M.J. Abad, P. Go´mez-Serranillosa, P.A. Liso, A. Villar and X. Chiriboga. 1998. Antiinflammatory and antioxidant activity of plants used in traditional medicine in Ecuador. **Journal of Ethnopharmacology** 61: 161-166.

Sabir, S.M., M.L. Athayde, A.A. Boligon and J.B.T. Rocha. 2017. Antioxidant activities and phenolic profile of *Baccharis trimera*, a commonly used medicinal plant from Brazil. **South African Journal of Botany** 113: 318-323.

Said Al-Muniri, R.M. and H.A. Hossain. 2017. Evaluation of antioxidant and cytotoxic activities of different extracts of folk medicinal plant *Hapllophyllum tuberculatum*. **Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences** 4: 101-106.

Twilley, D., L. Langhansová, D. Palaniswamy and N. Lall. 2017. Evaluation of traditionally used medicinal plants for anticancer, antioxidant, anti-inflammatory and anti-viral (HPV-1) activity. **South African Journal of Botany** 112: 494-500.

A Newly Isolated Halophilic Anaerobic Bacterium That Producing β-Glucosidase, *Halanaerobium praevalens* Strain SP3-14 from Saltern Ponds

Sobroney Heng[1], Chakrit Tachaapaikoon[1,2*], Patthra Pason[1,2], Rattiya Waeonukul[1,2], Sirilak Baramee[1,2], Akihiko Kosugi[3], Prattana Ketbot[2],Sreyneang Nhim[2],Waraporn Apiwatanapiwat[4] and Khanok Ratanakhanokchai[1]

ABSTRACT

The halophilic microorganisms are excellence sources of enzymes that active and tolerant with salt condition. In this study, screening and isolation of extremely halophilic anaerobic bacterium was performed. In total, 200 isolates were screened and isolated from 56 soil samples from salt evaporation ponds in Thailand. Among of them, a candidate given namely SP3-14 showed quickly and the highest growth at 30% (w/v) NaCl when compared with other candidates. This strain could not growth without NaCl (at least 10% NaCl). The strain was Gram-stain negative, non-motility and rod-shaped with a cell size of 0.6 x 1-3 μm. Optima growth of strain SP3-14 occurred at pH 7.0 and 37°C under anaerobic condition. A phylogenetic analysis based on 16S rRNA showed that the strain SP3-14 belonged within the genus *Halanaerobium* and was closely related to *Halanaerobium praevalens* DSM 2228^T, and *H. alcaliphilum* GSLS^T with 99.6 and 98.2% sequence similarity, respectively. The isolated SP3-14 should be classified as a specie of genus *Halanaerobium*, for which the name *H. praevalens* strain SP3-14. Furthermore, the β-glucosidase of the strain SP3-14 was characterized some properties. It revealed optimum pH and temperature as 4.0 and 70°C, respectively. This is the first report of β-glucosidase from *H. praevalens* species. Therefore, the newly isolated SP3-14 strain probable has the potential as an enzyme resource for applicable lignocellulose degradation under salt tolerant.

Key words: β-glucosidase, *Halanaerobium pravalens*, halophilic anaerobic bacterium, saltern ponds

*Corresponding author; e-mail address:**chakrit.tac@kmutt.ac.th**

[1]School of Bioresources and Technology, King Mongkut's Universityof Technology Thonburi, Bangkok10150, Thailand

[2]Pilot Plant Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10150, Thailand

[3]Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Tsukuba, Ibaraki, 305-8686, Japan

[4]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

INTRODUCTION

Halophiles are the microorganisms that can tolerate to high salt concentration. They can be found among all kingdoms of life such as bacteria, eukarya, and archaea (Joo and Kim, 2005). It has been isolated from saltern crystalized ponds, the Dead Sea, solar lakes and hypersaline lakes (Oren, 2002). Halophilic bacteria require salt to generate intracellular ion concentrations to maintain the balance of osmotic pressure in hypersaline environment. Hence, the halophiles are an excellence source of enzymes that are stable and active in the presence of high salt concentration (Yonezawa *et al*., 2007). According to the salt concentration required for optimal growth, halophiles have been classified into three types, slightly halophiles, moderately halophiles, and extremely halophiles. Slightly halophile, moderately halophile, and extremely halophiles were demonstrated to grow well at the salt concentration of 2-5%, 5-20%, and 20-30% NaCl, respectively (Joo and Kim, 2005; and Ventosa *et al*., 1998). Interestingly, amylase, protease, and lipase producing from halophilic anaerobic bacteria have been reported (Patel et al., 1993; Ryu et al., 1994). However, cellulolytic-producing halophilic anaerobic bacteria were seldom reported. In the realistic of saccharification process is mostly require high temperature that at least 37ºC to hydrolyze lignocellulosic material (Li *et al*., 2009). Therefore, a moderate or extremely with high temperature of active enzymes are attractively performed to practical uses. Cellulolytic enzyme system is a family of at least 3 groups of enzyme, consist of endo-(1,4)-β-D-glucanase (EC 3.2.1.4), exo-(1,4)-β-D-glucanase (EC 3.2.1.91), and β-glucosidases (EC 3.2.1.21). Among of them, β-glucosidase is play important role to hydrolyze cellobiose to glucose. β-glucosidase is generally responsible for the regulation of the whole cellulolytic process and is a rate-limiting factor during enzymatic hydrolysis of cellulose, as both endo-glucanase and exo-glucanase activities are often inhibited by cellobiose (Harhangi *et al*., 2002). Thus, β-glucosidase not only produces glucose from cellobiose, but also reduces cellobiose inhibition, allowing endo-glucanase and exo-glucanase enzymes to function more efficiently. In this study, the extremely halophilic anaerobic bacteria were screened and isolated from man-made environment. Subsequently, the β-glucosidase of the isolated strain was characterized.

MATERIALS AND METHODS

1. Sampling and medium

Soil samples were collected from saltern (salt evaporation) ponds at Samut Sakhon Province, Thailand. These samples were enriched in modified basal medium (BM) (Tachaapaikoon *et al*., 2012) containing (g/L) NaCl 300.0; KH_2PO_4 1.5; K_2HPO_4 2.9; Urea 2.1; yeast extraction 4.5; Cysteine 0.5; resazurin 0.0005; 0.2 ml of mineral solution. The mineral solution contained (per liter) 250 g of $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, 37.5 g of $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, and 0.3 g of $FeSO_4 \cdot 6H_2O$. The medium was supplemented with

glucose as the sole carbon source. The pH of the medium was adjusted to 7.0 and bubbling with nitrogen gas for made its anaerobically. The solid medium contained 15 g of agar per liter.

2. Screening and isolation of halophilic anaerobic bacteria

Fifty six of soil samples were put in the BM broth and incubated at 37°C for several days. Afterward, the grown cultures were enriched at the same fresh BM broth and repeatable to 6 times for enrichment culture. All stable enrichment cultures were used for isolation. The isolation of single colony was done by using Hungate roll tube technique. The stable enrichments were put and rolled in the tube for making thin film, then incubated at 37°C for several days. The colonies were appeared on the tube and then isolated single colony by needle into fresh BM broth again. Totally 200 isolates were obtained in this step. The isolate strain namely SP3-14 grew well under 30% NaCl within 24 hours when compared with other isolates, therefore this strain was used in the next step.

3. Phenotypic and biochemical characteristics of the strain SP3-14

To examine cell shape and spore formation, SP3-14was grown in the BM medium at 37°C for 48 hours. Traditional Gram staining was performed as described previously (Singleton, 2004) and spore formation was examined using the Schaeffer-Fulton staining method (Schaeffer and Fulton, 1993). The microscopic analysis was performed using an Olympus (CH20BIMF200) light microscope. The scanning electron microscopy (SEM) was used to study the morphology of the isolate SP3-14. SEM was performed using a SU8000 scanning electron microscope (Hitachi, Japan). Detection of motility was performed using semi-solid agar. To determine the optimum growth temperature, the isolates SP3-14 was cultured in BM and incubated at difference temperature in the range 25-60°C in incubators. For observation of optimum pH range for growth, the pH was adjusted with 2M HCl or 1M NaOH to an acidic or alkaline pH, respectively. To determine the optimum of salt concentration on growth was examined by adding 0-30% (w/v) NaCl into BM medium.

4. 16S rRNA gene analysis and phylogenetic analysis of the strain SP3-14

For identification of strains by 16s rRNA gene sequencing analysis, the genomic DNA was extracted by Phenol-Chloroform Isoamyl Alcohol (PCI) DNA Extraction method. The 16s rRNA gene was amplified by PCR using the following primers: 8F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') and 1492R (5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3') (Weisburg *et al*., 1991). PCR products were purified using the QIAquick PCR purification kit (QIAGEN, Germany). The 16S rRNA gene sequence was obtained by using MicroSEQ®16S rRNA gene sequencing kit containing universal primers (Applied Biosystems Inc., CA, and USA). The identification of phylogenetic neighbors was initially carried out by the BLAST programs against the database of type strains with published prokaryotic names. A phylogenetic tree

was constructed by the neighbor-joining method (Saitou and Nei, 1987) conducted in MEGA6.0 software (Tamara *et al*., 2013).

5. Enzyme production

Strain SP3-14 was grown in BM medium containing glucose as the sole carbon source. The cultures were incubated at 37°C until the late exponential growth phase and harvested by centrifugation (8,000 rpm and 15minutes) at 4°C. The cell pellet was collected and washed with the sodium phosphate buffer (pH 7.0) for several times. After that, the cell pellet was breaking with ultrasonic sonicator. Intracellular supernatant was used as the crude enzyme.

6. β-Glucosidase enzyme assay

β-glucosidase was assayed using *p*-nitrophenyl-β-D-glucopyranoside (*p*NPG) (Tachaapaikoon et al., 2012). A reaction mixture (100 µl) containing 50µl of enzyme, 50 µl of *p*NPG (10mM) as substrate and sodium phosphate buffer (50 mM, pH 6.0) was incubated at 50ºC for 30 min, the reaction was terminated by addition of 100 µl of sodium carbonatesolution (0.4 M, pH 10.8). The absorbance was read at 405 nm using microplate reader (MULTISKAN; Labsystems). The amount of *p*-nitrophenol released was quantified using the pNP standard. One unit of β-glucosidase activity was expressed as the amount of enzyme required to release 1 µmole of *p*NP per minute under the assay condition.

7. Effect of pH and temperature on enzyme activity

The optimum pH of enzyme was measured at various pH(s) under the standard assay conditions as described above. The reaction pH was adjusted with 50 mM various buffers such as acetate buffer (pH 3.0 to 6.0), phosphate buffer (pH 6.0-7.0) and Tris-HCl buffer (pH 7.0 to 9.0). The optimum temperature for β-glucosidase activity was determined by incubating the enzyme at different temperatures (20–80°C).

RESULTS AND DISCUSSION

1. Screening and Isolation a newly extremely halophilic anaerobic bacterium

Total 56 soil samples were taken from several places especially of salt evaporation ponds in Samut Sakhon province, Thailand. The halophiles anaerobic bacterium has been reported that can be isolated from different marine and hypersaline environments such as Sehline Sebkha in Tunisia, Great Salt Lake, and Retba Lake in Senegal (Abdeljabbar*et al*., 2013). Hence, the present study was carried out to screen and isolated halophilic anaerobic bacteria from the various evaporation ponds. The result showed that among of soil samples, 6 (11%) could be grow in 30% of NaCl (data not shown). Six

enrichment cultures were done single colony isolation. Subsequently, 200 isolates were performed from 6 enrichment cultures. Interestingly, a candidate given namely SP3-14 showed the highest and quickly growth on the BM broth in 30% NaCl. Thus, this isolate was characterized in this study.

2. Phenotypic and biochemical characteristics

Strain SP3-14 was anaerobic, Gram-negative, non-motile, rod shaped (0.6 x1-3 μm) bacterium, and the endospore were observed. Colonies on BM agar in Hungate tube were glowing slightly white, 1.0-2.0 mm in diameter. Growth was inhibited without NaCl. It needs at least 10% NaCl for growth. The strain SP3-14 utilized glucose, galactose, lactose, maltose, sucrose, xylose and ethanol. Arabinose, fructose and raffinose could not utilized. Optimal growth was obtained at 37°C, and no growth occurred at 60°C. Moreover, the isolate strain SP3-14 might be differentiated from the other related *Halanaerobium* species by means of some phenotypic characteristics (Table 1) such as the strain SP3-14 was able to growth at 55°C, pH 5.0, while related type could not growth. The SP3-14 could not use fructose as carbon source, but other related *Halanaerobium* species can be utilization. Besides, the isolates grew in the salt concentration range from 10-30% NaCl, with an optimum 20% NaCl. The result indicated that this isolate is extremely halophile according to classification by Joo and Kim, 2005.

Table 1 Differentiation of strain SP3-14 from related members in genus *Halanaerobium.*

Strains: 1, SP3-14; 2, *H. praevalens* DSM 2228; 3,*H. alcaliphilum* GSLS (DSM 8275)

Characteristic	1*	2$	3$
Morphology	Rods	Rods	Rods
Cell size (μm)	0.6 x 1 -3	0.5 -1 x 2 -4	0.5 x 2 - 3
Gram stain reaction	Negative	Negative	Negative
Motility	Negative	Negative	Positive
NaCl concentration range (%)	10-30	4-24	7.5-34
Optimum NaCl (%)	20	10	18-20
Temperature range (°C)	25-55	20-45	20-50
Optimum Temperature(°C)	37	42	40
pH range	5.5-10	6.3-8.5	ND
Optimum pH	7.0	7.0	7.0
Isolation source	Salt evaporation pond	Oil well	Retba Lake

ND = not determined

* Data from this study; $Data from Hadi *et al*., 2013

3. Phylogenic analysis

Phylogenetic analysis of the nucleotide sequence of 16S rRNA gene revealed that strain SP3-14 belonged to genus *Halanaerobium* (Figure 1). Trees conducted by the neighbor-joining methods. The strain SP3-14 showed high phylogenetic relatedness with *H. praevalens* DSM 2228 (99.6% similarity), *H. alcaliphilum* GSLS (98.2% similarity). Therefore, the isolate is *H. praevalens* strain SP3-14.

4. Characterization of β-glucosidase

β-glucosidase is an important key of cellulolytic enzyme system for biomass degradation and has been in several reports. *H. praevalens* DSM 2228 was reported in 1983 (Zeikus et al., 1983), after that complete genome sequence of the extremely halophilic *H. praevalens* was done and reported (Ivanova et al., 2011). Surprisingly, no have report about glycoside hydrolase enzyme especially β-glucosidase from *H. praevalens*. To make certain of this assumption, whole genome sequencing of *H. praevalens* was investigated. It revealed that some genes in the genome are predicted involve with glycoside hydrolase function. Therefore, β-glucosidase of the isolate SP3-14 was considered and characterized. The β-glucosidase of strain SP3-14 was intracellular enzyme. The enzyme from strain SP3-14 presented its optimum activity at pH 4.0 (Figure 2A). The optimum temperature was found to be 70°C, although activity was exhibited across a board temperature range from 40 to 80°C with more than 70% relative activity of the optimum value (Figure 2B).

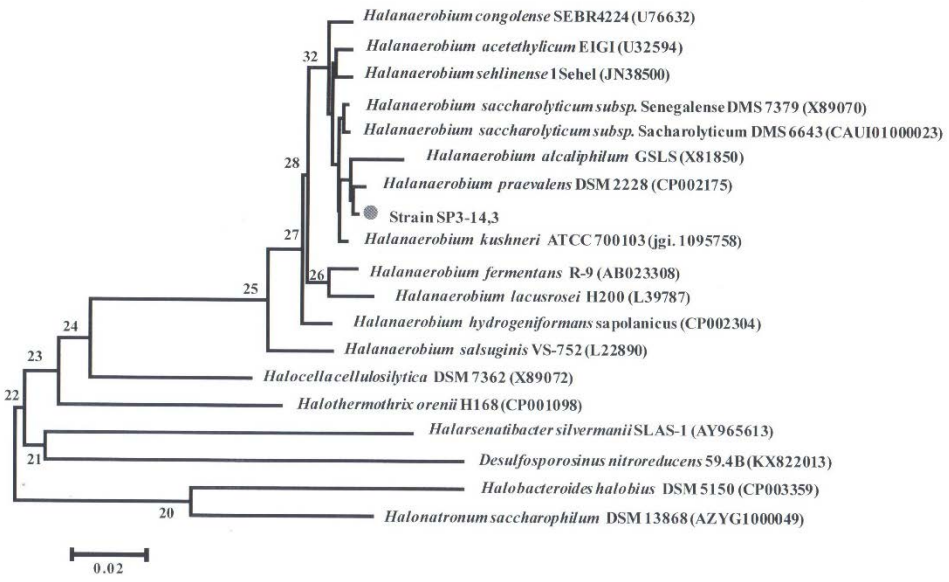


Figure 1 Phylogenetic relationship of *H. praevalens* strain SP3-14, with other member in genus *Halanaerobium*. The phylogenetic tree is based on the comparison of nearly complete 16S rRNA gene sequences (1500bp) and was conducted using the neighbor-joining method.

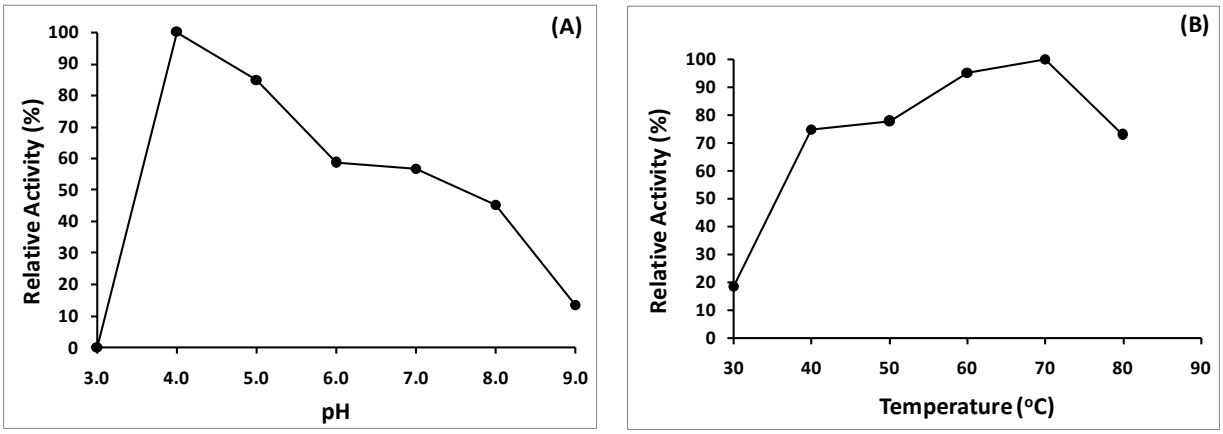


Figure 2 Optimum pH (A) and temperature (B) of β-glucosidase from *H. praevalens* strain SP3-14.

CONCLUSION

Extremely halophilic anaerobic bacterium, strain SP3-14 was successful isolated from saltern ponds. The isolated strain SP3-14 was identified as *H. pravalens*. Cells are rod shaped (0.6x1-3 μm), Gram-negative and non-motility. Growth occurs between 25 to 55°C, with the optimum 37°C and no growth at 60°C. The pH range for growth is 5.5 to 10.0, with the optimum growth at 7.0. The isolated strain no growth in the medium without NaCl. *H. praevalens* strain SP3-14 produced intracellular thermostable β-glucosidase. In addition, this is the first report of the β-glucosidase from *H. praevalens* specie.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by King Mongkut's university of Technology Thonburi through the "KMUTT 55th anniversary Commenmorative Fund", and Japan International Research Center for Agricultural Sciences.

REFERENCES

Abdeljabbar, H., Cayol, J.L., Hania, W.B., Boudabous, A., Sadfi, N. and Fardeau, M.L., 2013. Halanaerobiumsehlinense sp. nov., an extremely halophilic, fermentative, strictly anaerobic bacterium from sediments of the hypersaline lake SehlineSebkha. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, 63: 2069-2074.

Hadi, A., 2013. A critical appraisal of Grice's cooperative principle. **Open Journal of Modern Linguistics**, 3: 69.

Harhangi, H.R., Steenbakkers, P.J., Akhmanova, A., Jetten, M.S., van der Drift, C. and den Camp, H.J.O., 2002. A highly expressed family 1 β-glucosidase with transglycosylation capacity from the anaerobic fungus Piromyces sp. E2. **Biochimica Et Biophysica Acta (BBA)-Gene Structure and Expression**, 1574: 293-303.

Ivanova, N., et al., 2011.Complet genome sequence of the extremely halophilic Halanaerobiumpraevalens type strain (GSL^T). **Standards in Genomic Sciences**, 4: 312-321.

Joo, W.A. and Kim, C.W., 2005. Proteomics of halophilic archaea. **Journal of Chromatography B**, 237-250.

Li, Q., He, Y.C., Xian, M., Jun, G., Xu, X., Yang, J.M. and Li, L.Z., 2009.Improving enzymatic hydrolysis of wheat straw using ionic liquid 1-ethyl-3-methyl imidazolium diethyl phosphate pretreatment. **Bioresource Technology**, 100: 3570-3575.

Oren, A., 2002. Diversity of halophilic microorganisms: environments, phylogeny, physiology, and applications. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, 28: 56-63.

Patel, R.N., Grabski, A.C. and Jeffries, T.W., 1993. Chromophore release from kraft pulp by purified Streptomyces roseiscleroticus xylanases. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 39: 405-412.

Ryu, K., Kim, J. and Dordick, J.S., 1994. Catalytic properties and potential of an extracellular protease from an extreme halophile. **Enzyme and Microbial Technology**, 16: 266-275.

Saitou, N. and Nei, M., 1987. The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. **Molecular biology and evolution**, *4*: 406-425.

Schaeffer, A.B. and Fulton, M.D., 1933. A simplified method of staining endospores. **Science**, *77*, 194-194.

Singleton, P., 2004.Bacteria in biology, **Biotechnology and Medicine** (No.Ed. 6). John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England.

Tachaapaikoon, C., Kosugi, A., Pason, P., Waeonukul, R., Ratanakhanokchai, K., Kyu, K.L., Arai, T., Murata, Y. and Mori, Y., 2012. Isolation and characterization of a new cellulosome-producing *Clostridium thermocellum* strain. **Biodegradation**, 23:57-68.

Tamura, K., Stecher, G., Peterson, D., Filipski, A. and Kumar, S., 2013. MEGA6: molecular evolutionary genetics analysis version 6.0. **Molecular Biology and Evolution**, 30: 2725-2729.

Ventosa, A., Nieto, J.J. and Oren, A., 1998. Biology of moderately halophilic aerobic bacteria. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, 62: 504-544.

Weisburg, W.G., Barns, S.M., Pelletier, D.A. and Lane, D.J., 1991.16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. **Journal of Bacteriology**, 173: 697-703.

Yonezawa, Y., Izutsu, K.I., Tokunaga, H., Maeda, H., Arakawa, T. and Tokunaga, M., 2007. Dimeric structure of nucleoside diphosphate kinase from moderately halophilic bacterium: contrast to the tetrameric Pseudomonas counterpart. **FEMS Microbiology Letters**, 268: 52-58.

Zeikus, J.G., Hegge, P.W., Thompson, T.E., Phelps, T.J. and Langworthy, T.A., 1983. Isolation and description of *Haloanaerobiumparevalens* gen. nov.and sp. nov., an obligately anaerobic halophile common to great salt lake sediments. **Current Microbiology**, 9:225-234

การย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้อากาศของกากตะกอนและตะกอนไขมันจากระบบบำบัดน้ำเสีย

Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Fat Sludge

กรประภา กาญจนะ[1*] ศุภกิจ ศรีสวัสดิ์[1] ภิญญาพัชญ์ บุญครอง[1] กิตติ จำจด[1] และ โศภณ พวงจันทร์[1]

Kornprabha Khanchana[1*], Supakit Srisawat[1] Pinyapat Boonkrong[1] Kitti Jamjot[1] and Sophon Puangjun[1]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาผลของการย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้อากาศของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (Waste Activated Sludge, WAS) และตะกอนไขมัน (Fat Sludge, FS) แบ่งการทดลองเป็น 4 ชุด ได้แก่ ชุดที่ 1 ตะกอน WAS อย่างเดียว ชุดที่ 2 ตะกอน FS ปริมาณต่างๆคิดเป็นร้อยละ 100, 75, 50 และ 25 ชุดที่ 3 ใช้อัตราส่วนของ FS : WAS แตกต่างกัน (คิดเป็นร้อยละ) คือ 75 : 25, 50 : 50 และ 25 : 75 และชุดที่ 4 ชุดควบคุม ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ ซีโอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนีย สภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย พีเอช และปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม ทำการทดลองเป็นเวลา 60 วัน ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วน FS : WAS เท่ากับ 25 : 75 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 61.92 และมีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 124.2 มิลลิลิตร และมีค่าทีเคเอ็น แอมโมเนีย สภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย พีเอชเท่ากับ 163.5 มิลลิกรัมต่อลิตร, 153 มิลลิกรัมต่อลิตร, 1,006.7 มิลลิกรัมต่อลิตร, 3,101 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 7.31 ตามลำดับ

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the co-digestion of waste activated sludge (WAS) and fat sludge (FS). The experiment was divided into 4 set: 1. WAS 100%, 2. FS 100, 75, 50 and 25%, 3. FS : WAS ratio 75 : 25, 50 : 50, and 25 : 75, and 4. Control. The experimental time was 60 days. COD, TKN, ammonia alkalinity, volatile fatty acids, and pH were analyzed. The result showed that FS : WAS ratio of 25 : 75 gave the highest COD removal (61.92%) and biogas production (124.2 ml). In addition, TKN, ammonia, alkalinity, volatile fatty acids and pH were 163.5 mg/L, 153 mg/L, 1,006.7 mg/L, 3,101 mg/L และ 7.31, respectively.

Key Words: anaerobic co-digestion, waste activated sludge, fat sludge

* Corresponding author; e-mail address: kornprab@yahoo.com

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

[1]Department of Biotechnology, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 20131

คำนำ

ไขมันและน้ำมันที่ปนอยู่ในน้ำเสียที่มีแหล่งมาจากกิจกรรมการใช้น้ำ โดยเฉพาะจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตอาหาร และโรงฆ่าสัตว์ เมื่อปล่อยน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนด้วยน้ำมันหรือไขมันลงสู่ท่อระบายน้ำหรือระบบรวบรวมน้ำเสีย ทำให้เกิดการสะสมของไขและน้ำมันตามผนังท่อระบายน้ำและทำให้เกิดการอุดตัน (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2551) วิธีการที่ใช้กำจัดไขมันและน้ำมันในปัจจุบัน ได้แก่ การปล่อยทิ้งลงบนดิน การฝังกลบ และการเผา เป็นต้น แต่วิธีการดังกล่างอาจก่อให้เกิดปัญหาตามมา เช่น การปนเปื้อนธาตุอาหารเกินความจำเป็นสู่สิ่งแวดล้อม การเกิดแก๊สเรือนกระจก และการเกิดมลพิษทางอากาศ (Long และคณะ, 2012)

การนำไขมันและน้ำมันเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic digestion) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถกำจัดของเสียประเภทนี้ได้ผลดี และยังได้ผลพลอยได้เป็นแก๊สชีวภาพ (Biogas) ซึ่งสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การย่อยสลายไขมันและน้ำมันแบบไม่ใช้อากาศมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ไขมันและน้ำมันอาจห่อหุ้มรอบเซลล์จุลินทรีย์ ทำให้ขัดขวางการขนส่งสารต่างๆระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ การสะสมกรดไขมันที่เกิดจากปฏิกิริยาย่อยสลายไขมัน มีความเป็นพิษต่อเซลล์จุลินทรีย์ เป็นต้น ดังนั้นการย่อยสลายร่วม (Co-digestion) ระหว่างไขมันและน้ำมันกับขยะอินทรีย์ จึงเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายและการผลิตแก๊สชีวภาพได้ เนื่องจากการย่อยสลายร่วมสามารถลดการยับยั้งความเป็นพิษ และช่วยปรับสมดุลของธาตุอาหารได้อีกด้วย (Wan และคณะ, 2011)

การศึกษาครั้งนี้ มีแนวความคิดที่จะนำตะกอนไขมันที่เกิดจากระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งมาย่อยสลายร่วมกับกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) ซึ่งมีความจำเป็นต้องหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของตะกอนทั้งสองชนิดสำหรับการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ ก่อนที่จะพัฒนาเป็นการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์แบบที่มีการป้อนของเสียแบบต่อเนื่องต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ลักษณะและแหล่งที่มาของตะกอน

กากตะกอนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์มาจากระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท คิงฟิชเชอร์ โฮลดิ้งส์ จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานแปรรูปอาหารทะเล กากตะกอนที่นำมาศึกษามี 2 ประเภท คือตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Waste activated sludge, WAS) มีลักษณะเป็นตะกอนข้น สีน้ำตาลเข้ม เก็บตัวอย่างจากบ่อตกตะกอนที่มีการเติมสารโพลิเมอร์ก่อนส่งเข้าเครื่องรีดตะกอน และตะกอนไขมัน (Fat sludge, FS) ซึ่งได้จากเครื่องลอยตัวด้วยอากาศ (Dissolved air floatation) มีลักษณะเป็นตะกอนข้น สีเทา มีกลิ่นเหม็นคาวรุนแรง ลักษณะของตะกอนทั้งสองประเภทดังใน Figure 1 และ 2

Figure 1 Characteristics of Waste activated sludge, WAS, collected from wastewater treatment plant

Figure 2 Characteristics of Fat sludge, FS, collected from seafood production plant

ลักษณะและแหล่งที่มาของหัวเชื้อจุลินทรีย์แอนแอโรบิก

หัวเชื้อจุลินทรีย์แอนแอโรบิกได้รับความอนุเคราะห์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเพรสซิเดนท์เบเกอรี่ หัวเชื้อจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นเม็ดแกรนูล สีดำ มันวาว (Figure 4) และมีค่าของแข็งระเหยได้ (Volatile solids, VS) เท่ากับ 0.002 กรัมต่อกรัม

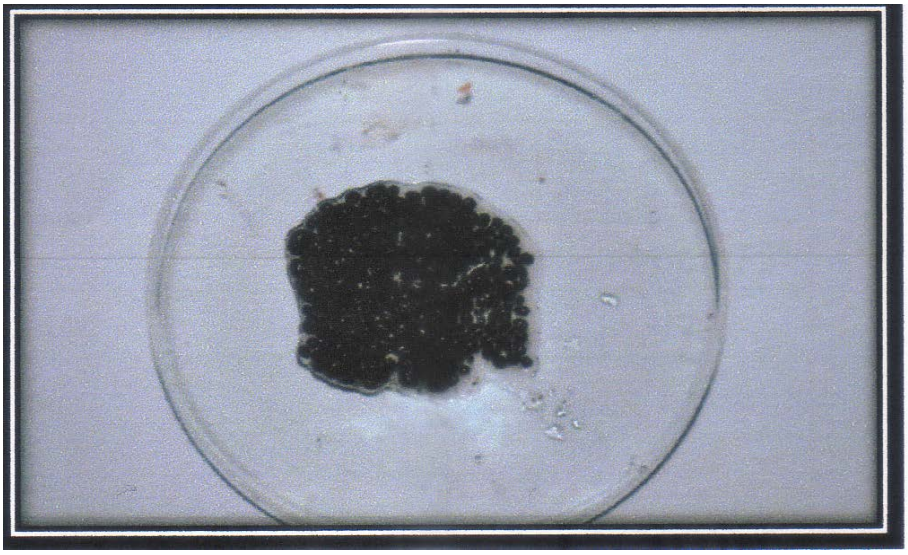


Figure 4 Anaerobic microbial seed

การย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ

แบ่งการทดลองเป็น 4 ชุดดังนี้

ชุดที่ 1 ชั่งตะกอน WAS น้ำหนัก 7.5 กรัม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 75 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดซีรั่มขนาด 100 มิลลิลิตร คิดเป็น WAS 100%

ชุดที่ 2 ชั่งตะกอน FS น้ำหนัก 7.5, 5.62, 3.75, และ 1.88 กรัม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 75 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดซีรั่มขนาด 100 มิลลิลิตร คิดเป็น FS 100, 75, 50 และ 25% ตามลำดับ

ชุดที่ 3 ชั่งตะกอน FS และ WAS ตามอัตราส่วนดังนี้ 5.62:1.88, 3.75:3.75 และ 1.88:5.62 กรัม:กรัม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 75 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดซีรั่มขนาด 100 มิลลิลิตร คิดเป็นอัตราส่วน FS:WAS 75:25, 50:50 และ 25:75 ตามลำดับ

ชุดที่ 4 ชุดควบคุม เติมน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตรในขวดซีรั่มขนาด 100 มิลลิลิตร

จากนั้นใส่หัวเชื้อแอนแอโรบิค 0.075 กรัมทุกชุดการทดลอง คิดเป็นร้อยละ 1 ของน้ำหนักของเสียทั้งหมด (Silvestre, et al, 2009) เขย่าให้ของผสมกระจายตัวทั่วถึง แล้วนำไปเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 1 นาทีเพื่อไล่แก๊สออกซิเจน ปิดฝาขวดซีรั่มด้วยจุกยางและฝาครอบอลูมิเนียม บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 วัน วิเคราะห์ลักษณะของกากตะกอนวันที่ 0 และ 60 ของการทดลองตามพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ ซีโอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียสภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และพีเอช ตามวิธีที่อยู่ในหนังสือ Standard methods for the examination of water and wastewater การวิเคราะห์ทำ 3 ซ้ำ สำหรับปริมาณแก๊สชีวภาพทำการวัดทุกวันด้วยวิธีการแทนที่น้ำ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ลักษณะของกากตะกอน WAS และ FS

ลักษณะของกากตะกอนทั้ง 2 ประเภทก่อนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศดังแสดงใน Table 1 พบว่ากากตะกอนทั้ง 2 ประเภทมีสภาพและปริมาณสารอาหารเพียงพอ และเหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ

และผลิตแก๊สชีวภาพ โดยพิจารณาจากค่าซีโอดี ของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยได้ ซึ่งสามารถแทนปริมาณสารอินทรีย์ อนึ่งการทดลองนี้ใช้กากตะกอนซึ่งเป็นของเสียที่มีลักษณะคล้ายดินเปียก จึงทำให้ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าบีโอดีได้ ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการทดลองของ Silvestre และคณะ, 2009 ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับตัวของจุลินทรีย์ต่อการย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้อากาศระหว่างตะกอนน้ำเสียกับตะกอนไขมัน สำหรับอัตราส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศนั้นยังไม่มีการกำหนดเป็นตัวเลขแน่นอนดังเช่นค่าอัตราส่วนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ อัตราส่วนดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณสมบัติของของเสีย (Khanal, 2008)

Table 1 Characteristics of waste activated sludge, WAS and fat sludge, FS

Parameter	WAS	FS
COD (mg/L)	15,355	30,578
Total Solids, TS (mg/L)	20,311	30,414
Volatile Solids, VS (mg/L)	9,847	9,560
TKN (mg/L)	7.87	143.85
Ammonia (mg/L)	3.52	133.20
Alkalinity (mg/L)	72.50	1,420
Volatile fatty acids (mg/L)	99.20	666.30
pH	6.42	7.77

ผลของการย่อยสลายร่วมของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียและตะกอนไขมัน

จากการศึกษาการกำจัดหรือการลดลงของค่าซีโอดีพบว่า ชุดการทดลองที่ใช้อัตราส่วน FS : WAS เท่ากับ 25 : 75 มีการลดลงของค่าซีโอดีมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 61.92 (Figure 3) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น สอดคล้องกับการทดลองของ Luostarinen และคณะ, 2009 โดยทำการทดลองการย่อยสลายร่วมระหว่างตะกอนน้ำเสียกับตะกอนไขมันจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของตะกอนไขมัน สามารถเพิ่มการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่วัดในรูปของซีโอดีได้

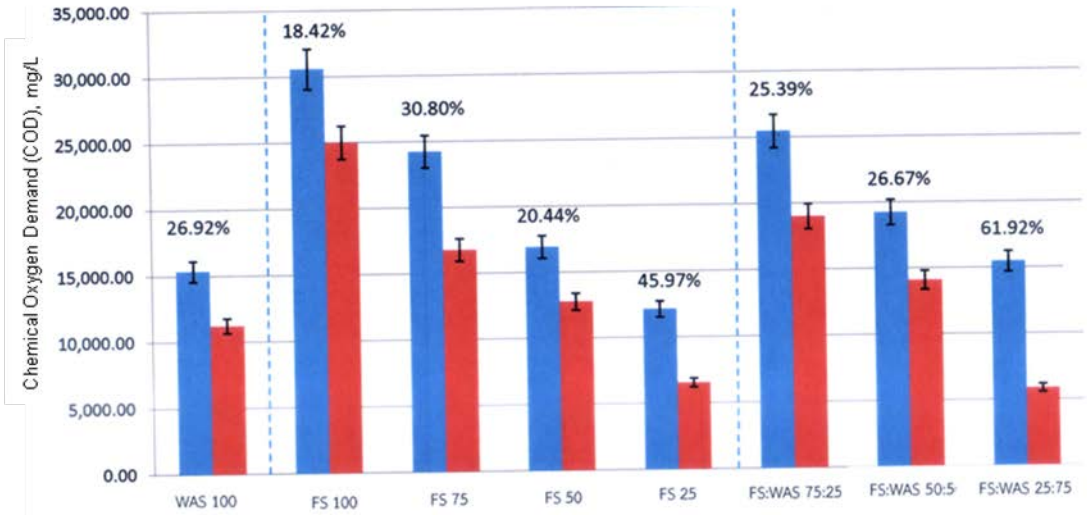


Figure 3 COD removal of anaerobic co-digestion of waste activated sludge and fat sludge, before anaerobic digestion, after anaerobic digestion, n = 3, % COD reduction was shown.

จากการวิเคราะห์ค่าทีเคเอ็นและแอมโมเนีย (Figure 4 และ 5) ของการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศของตะกอนพบว่า ทีเคเอ็นและแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ โดยอยู่ในช่วง 90 – 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 80 – 350 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อาจอธิบายได้ว่า จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนในตะกอน และปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาในรูปแอมโมเนีย ซึ่งจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งไนโตรเจน นอกจากนี้ แอมโมเนียยังช่วยในการรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างได้อีกด้วย

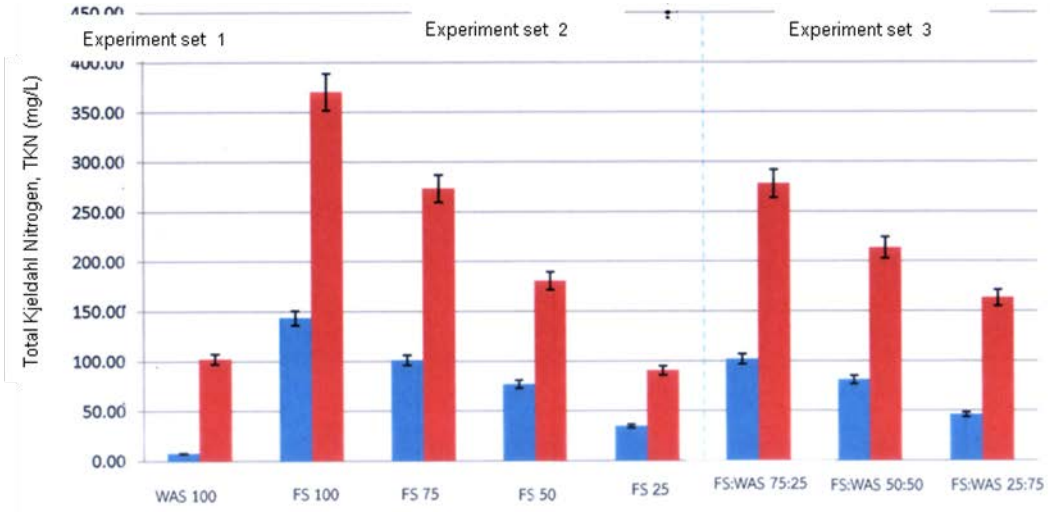


Figure 4 TKN variation before and after anaerobic digestion of waste activated sludge (WAS) and fat sludge (FS) , before anaerobic digestion, after anaerobic digestion, n = 3

สำหรับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Figure 6) พบว่ามีค่ามากกว่า 2,000 มิลิกรัมต่อลิตร แต่กลับพบว่าค่าพีเอชอยู่ในช่วงระหว่าง 6.5 – 7.5 อาจอธิบายได้ว่า ในปฏิกิริยาการย่อยสลายได้เกิดสารประกอบจำพวกคาร์บอเนต และแอมโมเนีย ซึ่งทำให้เกิดระบบบัฟเฟอร์ซึ่งช่วยสะเทินกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นและยังสามารถรักษาค่าพีเอชของระบบ (Khanal, 2008) ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ตามปกติ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Habiba และคณะ, 2009 ที่ทำการศึกษาการย่อยสลายร่วมระหว่างเศษผักผลไม้กับตะกอนน้ำเสีย

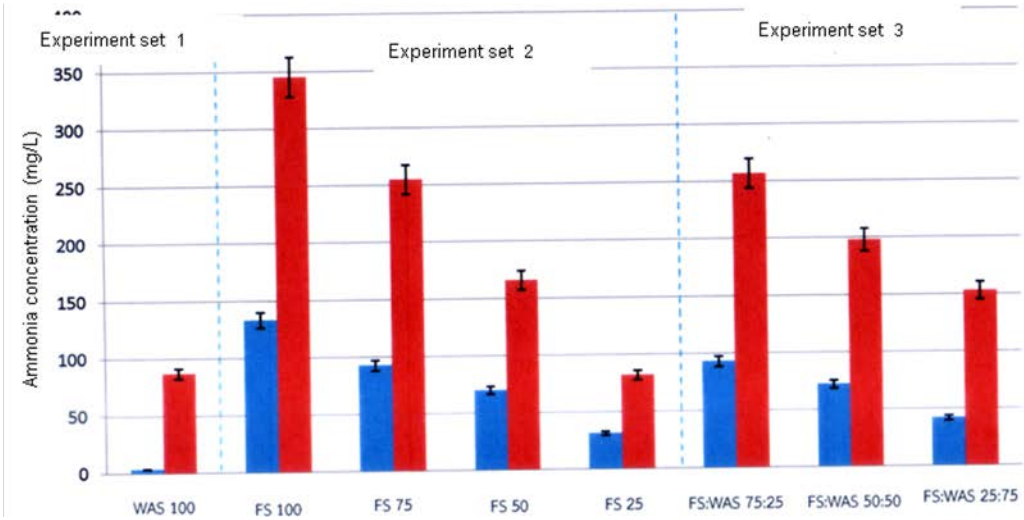


Figure 5 Ammonia variation before and after anaerobic digestion of waste activated sludge (WAS) and fat sludge (FS) , before anaerobic digestion, after anaerobic digestion, n = 3

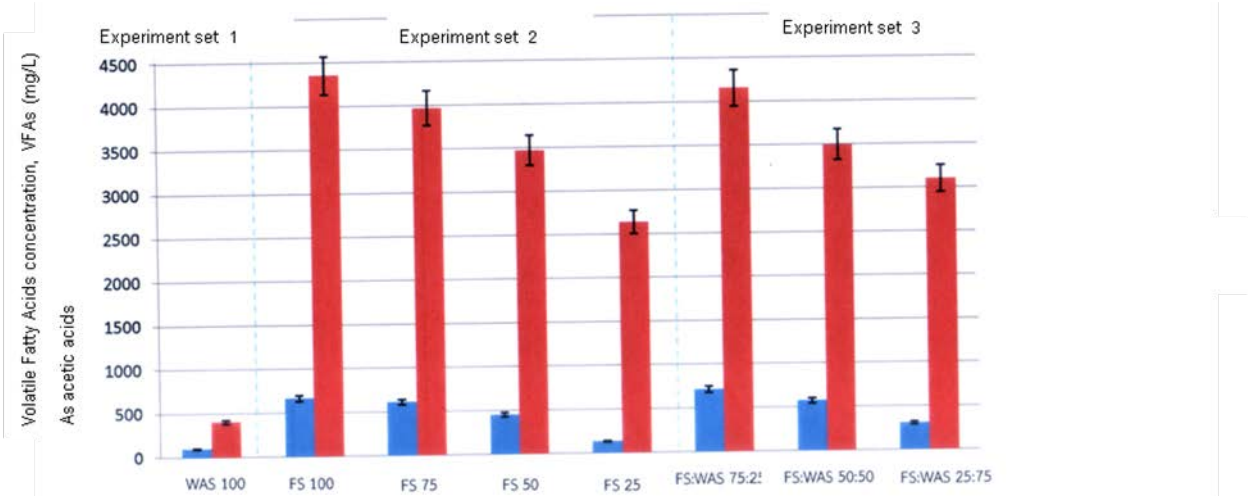


Figure 6 Volatile fatty acids variation before and after anaerobic digestion of waste activated sludge (WAS) and fat sludge (FS) before anaerobic digestion, after anaerobic digestion, n = 3

จากการวัดปริมาณแก๊สชีวภาพทุกวันเป็นเวลา 60 วัน แล้วนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟปริมาณแก๊สสะสม (Figure 7) พบว่าชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนระหว่างตะกอน FS : WAS เท่ากับ 25 : 75 ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 124.2 มิลลิลิตร และอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพเท่ากับ 2.07 มิลลิลิตรต่อวัน อาจเป็นไปได้ว่า ที่อัตราส่วนดังกล่าวมีสภาพเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ ไม่มีการสะสมกรดไขมันระเหยง่ายที่ทำให้เกิดการยับยั้งจุลินทรีย์ มีสารอาหารเหมาะสมและเกิดสมดุลของสารอาหาร

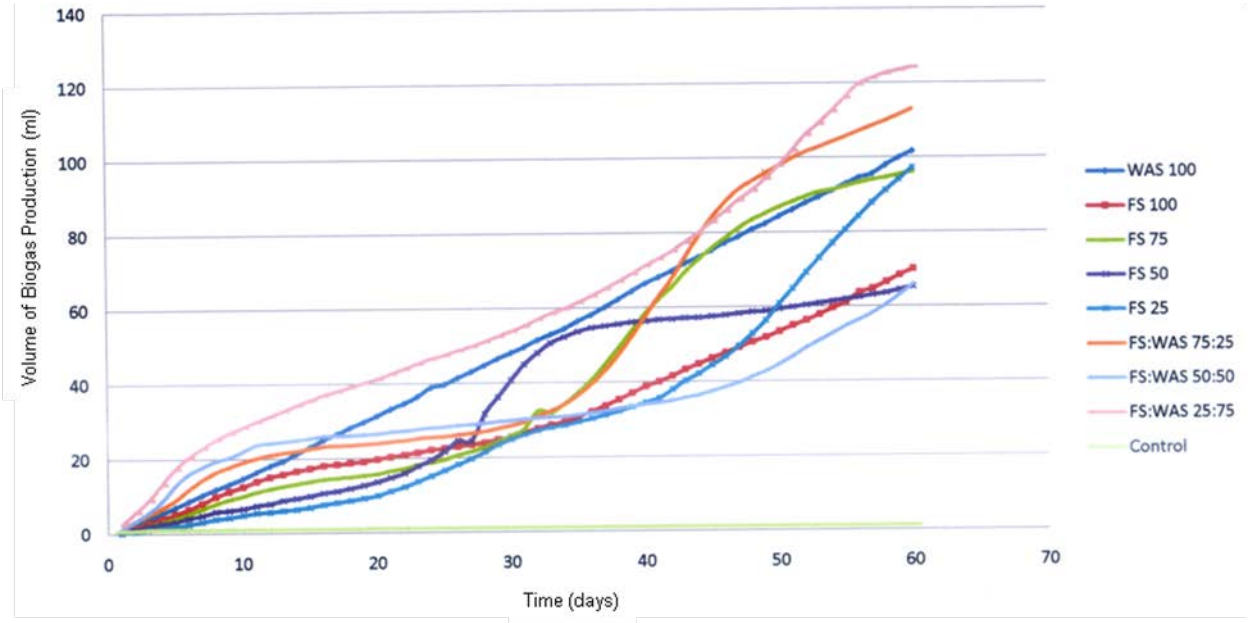


Figure 7 Biogas yield variation during anaerobic digestion of waste activated sludge (WAS) and fat sludge (FS)

สรุป

อัตราส่วนระหว่างตะกอน FS : WAS เท่ากับ 25 : 75 มีความเหมาะสมต่อการย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้อากาศ เนื่องจากมีสมดุลของสารอาหาร ไม่มีการสะสมกรดไขมันที่ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่า การย่อยสลายร่วมที่อัตราส่วนดังกล่าวไม่มีความจำเป็นต้องเติมสารเคมีประเภทด่างลงไปในระบบเพื่อรักษาค่าพีเอชให้เป็นกลาง และระบบยังคงมีการผลิตแก๊สชีวภาพสะสมอย่างต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าตลอดการทดลองปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูงมากก็ตาม เรื่องนี้จึงเป็นข้อดีของการย่อยสลายร่วมที่ใช้อัตราส่วนที่เหมาะสม หากมีการนำไปใช้จริงจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสียได้ด้วย ข้อมูลที่น่าสนใจอีกประการคือ การย่อยสลายสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการทำ Acclimation ก่อน สังเกตได้จากกราฟของปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม พบว่าไม่มีช่วง lag phase เลย ข้อมูลที่ได้ สามารถนำไปเป็นพื้นฐานในการพัฒนาถังปฏิกรณ์ที่มีการป้อนของเสียแบบต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท คิงฟิชเชอร์ โฮลดิ้งส์ จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2551.

APHA. 1989. Standard Method for examination of water and wastewater (18th ed). Washington D.C.: American Public Health Association.

Habiba, L., Hassib, B., Morktar, H. 2009. Improvement of activated sludge stabilization and filterability during anaerobic digestion by fruit and vegetable waste addition. **Bioresource Technology** 100: 1555 - 1560.

Khanal S.M. 2008. *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*. Ames, Iowa : Wiley-Blackwell.

Long, J. H., Aziz, T. N., Reyes, F. L., Ducoste, J. J. 2012. Anaerobic co-digestion of Fat, Oil and Grease (FOG): A Review of gas production and process limitation. **Process Safety and Environmental Protection** 90: 231 – 245.

Luostarinen, S., Luste, S., Sillanp M. 2009. Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant **Bioresource Technology** 100: 79 – 85.

Silvestre, G., Rodrguez-Abalde, A., Fernandez, B., Flotats, X., Bonmat, A. 2011. Biomass adaptation over anaerobic co-digestion of sewage sludge and trapped grease waste. **Bioresource Technology** 102: 6830 – 6836.

ฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ของราเอนโดไฟท์ที่แยกจากมะเม่าและโคลงเคลงในพื้นที่ป่าพรุควนเคร็ง

Antimicrobial Activity of Endophytic Fungi Isolated from *Antidesma velutinosum* Blume and *Melastoma malabathricum* L. at Kuankreng Peatlans

สุมาลี เลี่ยมทอง[1*] แน่งน้อย แสงเสน่ห์[2] และ โสภนา วงศ์ทอง[1]

Sumalee Liamthong[1*], Naengnoi Saengsanae[2] and Sophana Wongthong[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคของเชื้อราเอนโดไฟท์ที่แยกได้จากมะเม่าและโคลงเคลงที่ขึ้นในพื้นที่ป่าพรุควนเคร็ง เมื่อนำน้ำเลี้ยงเชื้อราเอนโดไฟท์จำนวน 127 ไอโซเลต ไปทดสอบฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคในคน 7 ชนิด พบว่ามีเชื้อราจำนวน 34 ไอโซเลต (26.8%) ที่ยับยั้งจุลินทรีย์ทดสอบอย่างน้อย 1 ชนิด เมื่อนำน้ำเลี้ยงเชื้อราและเส้นใยราที่มีฤทธิ์ในการทดสอบน้ำเลี้ยงเชื้อไปสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วนำมาทดสอบเพื่อหาค่า MIC พบว่าสารสกัดหยาบทั้งหมด 102 สาร สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ที่ระดับความเข้มข้น 200 µg/ml ได้ และมีสารสกัดหยาบ 6 สาร จากเชื้อรา 6 ไอโซเลต ที่ให้ค่า MIC $\leq$ 128 µg/ml ผลการจำแนกเชื้อราดังกล่าวด้วยวิธีการทางสัณฐานวิทยา พบว่าเป็นเชื้อรา *Aspergillus* sp., *Curvularia* sp., *Paecilomyces* sp., *Penicillium* sp., *Pestalotopsis* sp. และ sterile hyphae ผลจากการศึกษาในครั้งนี้แสดงว่าราเอนโดไฟท์จากพืชในป่าพรุควนเคร็ง เป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคที่สำคัญที่ช่วยควบคุมโรคติดเชื้อในมนุษย์ได้

ABSTRACT

The aim of this study was to study antimicrobial activity of endophytic fungi isolated from *Antidesma velutinosum* Blume. and *Melastoma malabathricum* L. at Kuanlreng Peatlans. Three week old culture broth of 127 endophytic fungi isolates were tested for antimicrobial activity against 7 human pathogenic microorganisms. Thirty-four isolates (26.8%) inhibited at least 1 pathogen. Culture broth and cells of active endophytes were further extracted with organic solvents and tested for MIC. The results showed that all 102 crude extracts inhibited pathogens at 200 µg/ml. Six crude extracts from 6 isolates showed $\leq$ 128 µ g/ml MIC. Morphological studies revealed that these isolates were *Aspergillus* sp., *Curvularia* sp., *Paecilomyces* sp., *Penicillium* sp. *Pestalotopsis* sp. and unidentified sterile hyphae. This study indicates that endophytic fungi from *A. velutinosum* Blume. and *M. malabathricum* L. at Kuankreng peatlans are potential sources of antimicrobial substance that might assist in the control of infectious disease in human.

Key Words :antimicrobial activity, endophytic fungi, *Antidesma velutinosum* Blume, *Melastoma malabathricum* L., peatlands

*Corresponding author; e-mail address :Sumalee_lia@hotmail.com

[1]Department of Biology, Faculty of Science, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Nakhon Si Thammarat 80280

[2]Department of Chemistry, Faculty of Science, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Nakhon Si Thammarat 80280

คำนำ

โรคติดเชื้อยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรคที่เกิดจากเชื้อดื้อยาก่อให้เกิดปัญหาในการรักษาเป็นอย่างมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องแสวงหายาต้านจุลินทรีย์ชนิดใหม่ ๆ มาใช้ทดแทนยาเดิมที่ใช้รักษาไม่ได้ผล ซึ่งแหล่งของสารต้านจุลินทรีย์แหล่งหนึ่งที่มีความสำคัญคือเชื้อราเอนโดไฟท์ (endophytic fungi) ซึ่งเป็นราที่อาศัยอยู่ภายในเนื้อเยื่อของพืชที่มีชีวิต โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่พืชที่เห็นได้ชัดโดยทันที (Bacon and White, 2000) เอนโดไฟท์มีอยู่เป็นจำนวนมาก จากการศึกษาพบจุลินทรีย์เอนโดไฟท์ในพืชทุกชนิดที่นำมาทำการทดสอบ (Guo et al., 2008) เอนโดไฟท์มีอยู่หลายชนิด โดยอาจจะเป็นแบคทีเรีย รา หรือแอคติโนมัยซีสแบคทีเรียที่มีการสร้างเส้นใยคล้ายราก็ได้ แต่พบว่าราเป็นเอนโดไฟท์ที่พบได้บ่อยที่สุด ราเอนโดไฟท์ส่วนใหญ่จะอยู่ร่วมกับพืชในลักษณะ symbiosis โดยพืชจะเป็นแหล่งที่อยู่และให้อาหารแก่เชื้อรา ในขณะที่เชื้อราจะผลิตสารออกมาเพื่อป้องกันตัวเองจากศัตรูพืช สัตว์ แมลง และจุลินทรีย์ ซึ่งพืชจะได้รับประโยชน์ด้วย (Huang et al., 2001) มีรายงานการศึกษาพบว่า 27-75% ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่แยกได้จากราเอนโดไฟท์เป็นสารใหม่ (Schulz et al., 2002; Strobel et al., 2003) โดยสารดังกล่าวมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค ยับยั้งเซลล์มะเร็ง ต้านอนุมูลอิสระ ลดปริมาณน้ำตาลในเลือด และฤทธิ์อื่น ๆ (Strobel et al., 1996; Li and Strobel, 2001; Stobel and Daisy, 2003; Guo et al., 2008) การศึกษาเชื้อราเอนโดไฟท์จึงน่าที่จะเป็นแนวทางในการค้นพบสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดใหม่ๆ ที่มีประโยชน์ในทางการแพทย์ การเกษตรและการอุตสาหกรรม (Bacon and White, 2000; Strobel and Daisy, 2003)

เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถสร้างสารทุติยภูมิที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพต้านจุลินทรีย์ชนิดอื่นได้ดีที่สุด ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมกับการเจริญของตัวเอง เพื่อช่วยให้สามารถมีชีวิตรอดได้มากที่สุด การศึกษาหาราเอนโดไฟท์จากต้นพืชที่เติบโตในแหล่งที่มีสภาพดินและน้ำเป็นกรดสูง เช่น ที่ป่าพรุควนเคร็ง จึงน่าที่จะพบราเอนโดไฟท์ที่สามารถผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดใหม่ได้เป็นอย่างดี ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาราเอนโดไฟท์จากต้นมะเม่า (*A. velutinosum* Blume) และโคลงเคลง (*M. malabathricum* L.) ที่ขึ้นอยู่ในพื้นที่ป่าพรุควนเคร็ง ตลอดจนการจำแนกประเภทของราเอนโดไฟท์ที่มีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคด้วยวิธีทางสัณฐานวิทยา เพื่อนำข้อมูลและเชื้อราที่ได้ไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บตัวอย่างพืช

เก็บตัวอย่างมะเม่าและโคลงเคลงที่ขึ้นในพื้นที่ป่าพรุควนเคร็ง ตำบลเคร็ง อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยเก็บตัวอย่างพืชต้นละ กิ่ง 5 ใบ และ 5 ต่อการเก็บตัวอย่าง 1 ครั้ง ทำการเก็บตัวอย่าง 4 ครั้ง ห่างกันครั้งละ 2 เดือน ตัวอย่างพืชที่เก็บมีลักษณะสมบูรณ์ ไม่มีลักษณะอาการของโรค นำตัวอย่างพืชมาล้างด้วย detergent ผึ่งให้แห้งภายใต้ laminar air flow เมื่อตัวอย่างพืชแห้งแล้ว ใช้ใบมีดผ่าตัดจุ่มแอลกอฮอล์ นำไปผ่านไฟแล้วตัดตัวอย่าง โดยตัดส่วนของเส้นใบ (vein) เส้นกลางใบ (midrib) แผ่นใบ (lamina) ให้มีขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร ก้านใบ (petriole) ให้มีความยาว 1 เซนติเมตร และกิ่ง (branch) ให้มีความหนา 0.3 เซนติเมตร จำนวน 2, 3, 3, 4 และ ชิ้น ตามลำดับ 10

การแยกราเอนโดไฟท์

นำชิ้นส่วนตัวอย่างพืชที่ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ มากำจัดเชื้อบริเวณผิวโดยแช่ใน 95% ethanol นาน 30 วินาที หลังจากนั้นนำไปแช่ใน 5% sodium hypochlorite นาน 5 นาที แล้วนำไปแช่ใน 95% ethanol อีกครั้งนาน 30 วินาที นำตัวอย่างมาล้างด้วยน้ำกลั่นฆ่าเชื้อแล้ว นาน 3-5 นาที แล้วนำตัวอย่างไปวางบนอาหาร PDA ที่เติมยาปฏิชีวนะ tetracycline และ ampicillin ความเข้มข้น 50 mg/l นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สังเกตผลทุกวัน เมื่อพบว่ามีการเจริญของเชื้อรางอกออกมาจากชิ้นส่วนตัวอย่างพืช ตัดส่วน hyphal tip ของเชื้อราแล้วนำไปเพาะเลี้ยงบนอาหาร PDA ที่ไม่เติมยาปฏิชีวนะ โดยเก็บตัวอย่างเชื้อราเป็นเวลา 7 วัน นับจากวันแรกที่พบการงอกของเชื้อราจากชิ้นส่วนตัวอย่าง เมื่อแยกเชื้อราได้บริสุทธิ์แล้ว เก็บเชื้อราบนอาหารวุ้นเอียง PDA เพื่อนำไปทดสอบต่อไป

การเพาะเลี้ยงเชื้อราเอนโดไฟท์ในอาหารเหลว

นำราเอนโดไฟท์ที่แยกได้ซึ่งมีลักษณะโคโลนีที่แตกต่างกันมาเพาะเลี้ยงในอาหาร PDA ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 3-4 วัน หรือจนกว่าจะพบว่ามีการเจริญของโคโลนีของเชื้อรา ใช้ใบมีดผ่าตัดจุ่ม 95% ethanol นำไปผ่านเปลวไฟ แล้วรอให้เย็น หลังจากนั้นนำไปตัดชิ้นส่วนบริเวณขอบของโคโลนีให้มีขนาดชิ้นละ 1×1 ตารางเซนติเมตร จำนวน 5 ชิ้น แล้วถ่ายเชื้อลงในอาหาร PDB ปริมาตร 300 ml ที่บรรจุในฟลาส์กขนาด 500 ml นำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 สัปดาห์ เมื่อครบกำหนด เก็บตัวอย่างน้ำเลี้ยงเชื้อราเอนโดไฟท์เพื่อนำไปทดสอบฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์เบื้องต้น จากนั้นนำเส้นใยและน้ำเลี้ยงเชื้อที่ได้ไปสกัดด้วยตัวทำละลายทางเคมีเพื่อทดสอบฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ของสารสกัดหยาบ

การทดสอบฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์

ทดสอบฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ก่อโรคสายพันธุ์มาตรฐานจำนวน 6 ชนิด คือ *Staphylococus aureus* ATCC29523, methicillin–resistant *Staphylococus aureus* SK1 (MRSA), *Pseudomonas aeruginosa* ATCC27853, *Escherichia coli* ATCC25922, *Candida albicans* ATCC90028 และ *Crytococcus neoformans* ATCC90012 และเชื้อจุลินทรีย์ที่แยกจากผู้ป่วย 1 ชนิด คือ *Microsporum gypsum* SH-MU-4โดยทำการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์เบื้องต้น สำหรับน้ำเลี้ยงเชื้อรา ด้วยวิธี agar well diffusion (Lorain, 1996)

2. ทดสอบฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ของสารสกัดหยาบจากเชื้อราเอนโดไฟท์ โดยวิธี colorimetric broth microdilution (ดัดแปลงจาก CLSI, 2000 CLSI, 2002a; CLSI, 2002b)

3. หาค่า minimal inhibitory concentration (MIC) โดยวิธี colorimetric broth microdilution และหาค่า MBC (minimum bactericidal concentration) หรือ MFC (minimum fungicidal concentration) ของสารสกัดหยาบจากน้ำเลี้ยงเชื้อรา ด้วยวิธี streak บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ

การจำแนกชนิดราเอนโดไฟท์โดยวิธีทางสัณฐานวิทยา

นำเชื้อราเอนโดไฟท์ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ดีไปเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA บ่มที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) เมื่อราเจริญและมีลักษณะโคโลนีที่เด่นชัด บันทึกภาพ บันทึกลักษณะ วัดขนาด และทำ slide culture เพื่อดูลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างสืบพันธุ์ทั้งชนิดมีเพศและไม่มีเพศภายใต้กล้องจุลทรรศน์ แล้วนำไปจำแนกเปรียบเทียบกับขนาดและลักษณะใน Illustrated Genera of Imperfect Fungi (Barnett and Hunter, 1998)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การแยกราเอนโดไฟท์จากมะเม่าและโคลงเคลง

ในการแยกราเอนโดไฟท์จากมะเม่าและโคลงเคลงที่ขึ้นในป่าพรุควนเคร็ง ในตำบลเคร็ง อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่า สามารถแยกราเอนโดไฟท์ได้ 127 ไอโซเลต เป็นเชื้อที่แยกได้จากมะเม่า 74 ไอโซเลต และโคลงเคลง 53 ไอโซเลต โดยสามารถแยกเชื้อราเอนโดไฟท์ได้จากทุกส่วนของพืชและแยกได้จากเส้นกลางใบมากที่สุด (Table 1) สอดคล้องกับที่ Cannon and Simmons (2002) และ Helander et al. (1993) ที่รายงานว่าสามารถแยกเอนโดไฟท์จากเส้นกลางใบหรือบริเวณใกล้ฐานของเส้นกลางใบได้มากกว่าแผ่นใบ ซึ่ง Saikkonen (2007) ได้อธิบายว่า อาจเป็นเพราะบริเวณส่วนดังกล่าวมีปริมาณน้ำมากกว่าแผ่นใบ จึงทำให้สปอร์ของราเอนโดไฟท์งอกได้ดีกว่า

Table 1 Endophytic fungi isolated from plants at Kuankreng peatlands

Host plants	Number of fungi isolates					
	Branch	Petiole	Vein	Lamina	Midrib	Total
A. velutinosum Blume.	14	14	1	27	18	74
M. malabathricum L.	11	9	1	12	20	53
Total	25	23	2	39	38	127

การทดสอบฤทธิ์เบื้องต้นในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคโดยวิธี agar well diffusion

จากการนำราเอนโดไฟท์ที่แยกได้จำนวนทั้งสิ้น 127 ไอโซเลต ไปเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDB เป็นเวลา 3 สัปดาห์ แล้วนำน้ำเลี้ยงเชื้อไปทดสอบฤทธิ์การยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค ด้วยวิธี agar well diffusion โดยทดสอบกับจุลินทรีย์ก่อโรค 7 ชนิด คือ *S. aureus* ATCC25923, MRSA SK1, *P. aeruginosa* ATCC27853, *E. coli* ATCC25922, *C. albicans* ATCC90028, *C. neoformans* ATCC90012 และ *M. gypseum* พบว่ามีเชื้อรา จำนวน 34 ไอโซเลต (26.8%) ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค อย่างน้อย 1 ชนิด (Table 2) เมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของผู้วิจัยคณะอื่นที่ศึกษาฤทธิ์ของราเอนโดไฟท์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคชนิดและจำนวนเดียวกับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าเปอร์เซ็นต์ของราเอนโดไฟท์ที่แยกจากมะเม่าและโคลงเคลงมีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคสูงกว่าการศึกษาของ Phongpaichit *et al*. (2006) ที่ศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพ

ของราเอนโดไฟท์ที่แยกจากพืชกลุ่ม *Garcinia* sp. แล้วพบว่า จากจำนวนราเอนโดไฟท์ที่นำมาทดสอบทั้งหมด 377 ไอโซเลต มีราเอนโดไฟท์ที่สร้างสารยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคอย่างน้อย 1 ชนิด จำนวน 70 ไอโซเลต (18.6%) แต่มีค่าต่ำกว่าการศึกษาของจำเนียรและคณะ (2556) ที่ได้ศึกษาราเอนโดไฟท์จากพืชในตระกูลไมร์ทาซิอี้ที่พบในป่าพรุควนเคร็งแล้วพบว่ามีราเอนโดไฟท์ 46 ไอโซเลต (37.1%) ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์อย่างน้อย 1 ชนิด

เมื่อพิจารณาถึงจำนวนชนิดของจุลินทรีย์ก่อโรคที่ถูกยับยั้งด้วยน้ำเลี้ยงราเอนโดไฟท์ พบว่าน้ำเลี้ยงราเอนโดไฟท์จากมะเม่าและโคลงเคลง สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคได้ 1-4 ชนิด และน้ำเลี้ยงราเอนโดไฟท์ส่วนใหญ่ (24 ไอโซเลต; 70.6%) มีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคเพียงชนิดเดียว ในขณะที่มีน้ำเลี้ยงจากราเอนโดไฟท์ 8 ไอโซเลต (23.5%) ที่สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคได้ 2 ชนิด และมีราเอนโดไฟท์ที่ยับยั้งเชื้อก่อโรคได้มากกว่า 2 ชนิด เพียง 2 ไอโซเลต (5.9%) (Table 2) แสดงว่าเชื้อราเอนโดไฟท์ที่แยกได้จากมะเม่าและโคลงเคลงที่ขึ้นในป่าพรุควนเคร็งมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแคบ (narrow spectrum)

Table 2 Number of pathogenic organisms inhibited by culture broth

Host plant	Total of test isolates	Number (%)* of pathogenic organisms inhibited by culture broth				
		1	2	3	4	Total
A. velutinosum Blume	74	19	5	0	1	25 (33.8%)
M. malabathricum L.	53	5	3	1	0	9 (17.0%)
Total	127	24 (70.6%)	8 (23.5%)	1 (2.9%)	1(2.9%)	34 (26.8%)

* (no. of active isolates/Total no. of isolates tested) x 100

เมื่อพิจารณาถึงชนิดของจุลินทรีย์ก่อโรคที่ถูกยับยั้งโดยเชื้อราเอนโดไฟท์ พบว่าน้ำเลี้ยงราเอนโดไฟท์มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก *S. aureus* ATCC25923, MRSA SK1 และเชื้อรา *M. gymseum* ได้ดี โดยมีเชื้อราเอนโดไฟท์ 18 (14.2%), 12 (9.4%) และ 12 (9.4%) ไอโซเลต จากเชื้อราที่นำมาทำการทดสอบทั้งสิ้น 127 ไอโซเลต ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคนี้ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำเลี้ยงราเอนโดไฟท์สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบ (*P. aeruginosa* ATCC27853 และ *E. coli* ATCC25922) และยีสต์ *C. albicans* ATCC90028 ได้น้อย โดยมีน้ำเลี้ยงราเอนโดไฟท์จากราเพียง 3 (2.4%), 1 (0.8%) และ 1 (0.8%) ไอโซเลต ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งยั้งเชื้อ *P.aeruginosa* ATCC27853, *E. coli* ATCC25922 และ *C. albicans* ATCC90028 ได้ตามลำดับ และไม่มีน้ำเลี้ยงราเอนโดไฟท์ใดที่ยับยั้ง *C. neoforman* ATCC90012 ได้ (Table 3)

Table 3 Antimicrobial activities in culture broth of fungi isolated from plants at Kuankreang peatlands

Host plant	Total of test isolated	Number of culture broth inhibiting growth of						
		SA	MRSA	PA	EC	CA	CN	MG
A. velutinosum Blume	74	12	8	3	1	0	0	9
M. malabathricum L.	53	6	4	0	0	1	0	3
Total	127	18	12	3	1	1	0	12

SA, *Staphylococus aureus* ATCC25923; MRSA, methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* SK1; PA, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC27853; EC, *Escherichia coli* ATCC25922; CA, *Candida albicans* ATCC90028; CN, *Cryptococcus neoformans* ATCC90012; MG = *Microsporum gypseum* SH-MU-4.

การทดสอบฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ของสารสกัดหยาบจากเชื้อราเอนโดไฟท์

เมื่อนำน้ำเลี้ยงเชื้อและเส้นใยของเชื้อราจำนวน 34 ไอโซเลต ที่มีฤทธิ์ในการทดสอบน้ำเลี้ยงเชื้อไปสกัดด้วยตัวทำละลาย ได้สารสกัดหยาบจากเชื้อราแต่ละไอโซเลตจำนวน 3 สาร คือ สารสกัดหยาบจากน้ำเลี้ยงราด้วยเอธิลอะซิเตต (Broth EtOAc; BE) สารสกัดหยาบจากเส้นใยราด้วยเฮกเซน(Cell hexane; CH และเอธิลอะซิเตต (Cell hexane; CH และ Cell EtOAc; CE) รวมสารสกัดหยาบที่ได้ทั้งหมด 102 สาร ผลการทดสอบฤทธิ์ยับยั้ง

จุลินทรีย์ก่อโรคพบว่าสารสกัดหยาบสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ที่ระดับความเข้มข้น 200 µg/ml ได้ แสดงว่าสารออกฤทธิ์ที่เชื้อราเอนโดไฟท์จากมะเม่าและโคลงเคลงสร้างขึ้นมีทั้งสารที่มีขั้วต่ำหรือขั้วปานกลางที่เชื้อราสร้างแล้วเก็บไว้ในเซลล์ และสารที่มีขั้วปานกลางที่เชื้อราสร้างแล้วปล่อยออกนอกเซลล์

เมื่อนำสารสกัดหยาบที่มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่ระดับความเข้มข้น 200 µg/ml ไปหาค่า MIC พบว่าสารสกัดส่วนใหญ่ (94.1%) ให้ค่า MIC เท่ากับ 200 µg/ml มีสารสกัดเพียง 6 สาร (5.9%) ที่สร้างจากเชื้อราเอนโดไฟท์ 6 ไอโซเลต ที่ให้ค่า MIC $\leq$ 128 µg/ml และสารสกัดหยาบทั้งหมดให้ค่า MIC ต่อเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบสูงกว่าค่า MIC ของยาปฏิชีวนะมาตรฐาน (Table 4) อย่างไรก็ตามหากนำสารสกัดหยาบมาทำให้บริสุทธิ์จะทำให้สารที่ได้มีฤทธิ์ดีขึ้น เช่นการศึกษาของ Maria *et al*. (2005) ที่พบว่า สารสกัดหยาบจากเชื้อ *Aspergillus* sp. 3 และ MS1 ไม่สามารถยับยั้งเชื้อ *Cryptococcus albidus* ได้ แต่เมื่อนำสารสกัดหยาบไปทำให้บริสุทธิ์ กลับพบว่าสามารถยับยั้งเชื้อดังกล่าวได้ ซึ่งอาจเป็นเพราะในสารสกัดหยาบมีสารออกฤทธิ์น้อยหรือมีสารหลายชนิดที่ออกฤทธิ์ต้านกัน เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์จึงได้สารที่มีความเข้มข้นมากขึ้นและออกฤทธิ์ได้ดีขึ้น และเนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดสอบฤทธิ์ของสารสกัดหยาบเฉพาะกับจุลินทรีย์ก่อโรคที่ถูกยับยั้งโดยน้ำเลี้ยงเชื้อ หากนำสารสกัดหยาบไปทดสอบกับจุลินทรีย์ทั้ง 7 ชนิดอีกครั้ง จำนวนสารสกัดที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์น่าจะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น

Table 4 MIC of antibiotics and crude extracts

Test Microorganism	Antibiotics	MIC / MIC range (µg/ml)	
		Antibiotics	Crude extracts
S. aureus ATCC25923	Vancomycin	1	128-200
MRSA SK1	Vancomycin	1	128-200
P. aeruginosa ATCC27853	Gentamicin	4	200
E. coli ATCC25922	Gentamicin	0.5	200
C. albicans ATCC90028	Amphotericin B	2	200
M. gypseum	Miconazole nitrate	1	32-200

จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าสารสกัดหยาบทั้งหมดที่นำมาทดสอบไม่มีฤทธิ์ฆ่าจุลินทรีย์ที่ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 200 µg/ml แสดงว่าสารสกัดหยาบมีฤทธิ์เพียงยับยั้งการเจริญที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าว อย่างไรก็ตามหากใช้ความเข้มข้นของสารสกัดหยาบในการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น สารบางชนิดอาจมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อได้

การจำแนกชนิดของราเอนโดไฟท์ที่มีค่า MIC $\leq$ 128 µg/ml

จากการนำเชื้อราเอนโดไฟท์ทั้ง 6 ไอโซเลต ที่ให้สารสกัดหยาบที่มีค่า MIC ต่อเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคที่ทดสอบ $\leq$ 128 µg/ml ไปจำแนกโดยอาศัยลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าเป็นเชื้อรา *Aspergillus* sp., *Curvularia* sp., *Paecilomyces* sp., *Penicillium* sp. *Pestalotopsis* sp. และ sterile hyphae จากชนิดของราที่แยกได้จากพืชในป่าพรุควนเคร็งที่มีฤทธิ์ดีที่จำแนกได้ พบว่าเป็นกลุ่มของราเอนโดไฟท์ที่พบได้บ่อยและพบมีการสร้างสารออกฤทธิ์ที่ดี สอดคล้องกับการรายงานของ Bérdy (2005) ที่รายงานว่า ในจำนวนสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

6,450 ชนิด มากกว่าร้อยละ 30 มาจากเชื้อราในกลุ่ม *Penicillium* และ *Aspergillus* Phongpaichit et al. (2006) ที่รายงานว่า เชื้อราเอนโดไฟท์ที่แยกได้จาก *Garcenia* sp. ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพดีเป็นเชื้อราที่จัดอยู่ในจีนัส *Aspergillus*, *Botryosphaeria*, *Eutypella*, *Fusarium*, *Guignardia*, *Pennicillium*, *Phomopsis* และ *Xylaria* และ Yu et al. (2010) ที่ได้ศึกษางานวิจัยจากคณะผู้วิจัยมากกว่า 20 คณะ แล้วรายงานว่าราเอนโดไฟท์ *Pestalotiopsis* sp., *Streptomyces* sp. และ *Phomopsis* sp. เป็นกลุ่มสร้างสารออกฤทธิ์ที่คณะผู้วิจัยแยกได้มากที่สุด

Table 5 Crude extracts and endophytic fungi with MIC $\leq$ 128 µg/ml

Test Microorganism	MIC (µg/ml)	Crude extracts	Endophytic fungi
S. aureus ATCC25923	128	4 AV L1.3 BE	*Pestalotopsis* sp.
	128	4 AV P1.11 BE	unidentified sterile hyphae
MRSA SK1	128	1 MM M1.3 BE	*Curvularia* sp.
M. gypseum	32	1 AV L1.2 CH	*Aspergillus* sp.
	128	1 MM B1.4 BE	*Paecilomyces* sp.
	128	4 AV L1.8 BE	*Penicillium* sp.

สรุป

จากการศึกษาฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ของราเอนโดไฟท์ที่แยกได้จากมะเม่าและโคลงเคลงที่ขึ้นในป่าพรุควนเคร็ง แสดงให้เห็นว่าราเอนโดไฟท์จากพืชในพื้นที่ป่าพรุควนเคร็งเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ที่ดี สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคในมนุษย์ได้หลายชนิด จึงควรที่จะแยกสาร วิเคราะห์สูตรโครงสร้าง ตลอดจนทำการตรวจวิเคราะห์ฤทธิ์ทางชีวภาพอื่น ๆ เช่น ฤทธิ์ในการต้านเชื้อวัณโรค ต้านเชื้อปรสิต ต้านเซลล์มะเร็ง หรือฤทธิ์อื่น ๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราชที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จำเนียร กิ้วเส้ง สุมาลี เลี่ยมทอง และศุภวรรณ พรหมเพรา. 2556. **ฤทธิต้านจุลินทรีย์ของราเอนโดไฟท์ที่แยกได้จากพืชสกุลไมร์ทาซีอี้ที่พบในพื้นที่ป่าพรุควนเคร็ง**.วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร ฉบับพิเศษการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5, 321-310.

Bacon, C.W. and J.F. White. (eds.). 2000. **Microbial endophytes.** Marcel-Dekker, New York. 487 pp.

Barnett, H.L. and Hunter, B.B. 1998. **Illustrated Genera of Imperfect Fungi**. 4th Edition. American Phytopathological Society, Minnesota. 218 pp.

Bérdy, J. 2005. Bioactive microbial metabolites: a personal view. **The journal of Antibiotics**. 58:1-26.

Cannon, P.F. and C.M Simmons. 2002. Diversity and host performance endophyte, *Trichoderma hamatum*, delays the onset of drought stress in *Theobroma cacao*. **Biological Control** 46: 24-35.

Clinical and Laboratory Standard Institute (CLSI). 2000. **Reference method for broth dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically**. Approved standard M7-A4. Clinical and Laboratory Standard Institute, Wayne, PA.

Clinical and Laboratory Standard Institute (CLSI). 2002a. **Reference method for broth dilution antifungal susceptibility testing of yeasts**. Approved standard M27-A2. Clinical and Laboratory Standard Institute, Wayne, PA.

Clinical and Laboratory Standard Institute (CLSI). 2002b. **Reference method for broth dilution antimicrobial susceptibility testing of filamentous fungi**. Approved standard M38-A. Clinical and Laboratory Standard Institute, Wayne, PA.

Guo, B., Y. Wang, X. Sun and K. Tang. 2008. Bioactive natural product from endophytes: A review. **Applied Biochemistry and Microbiology** 44: 136-142.

Helander, M.L., S. Neuvonen, T. Sieber and O. Petrini. 1993. Simulated acid rain affects birch leaf endophytic populations. **Microbial Ecology** 26: 227-234.

Huang, W.Y., Y.Z. Cai, J. Xing, H. Corke and M. Sun. 2007. Potential antioxidant resource: endophytic fungi isolated from traditional Chinese medicinal plants. **Economic Botany** 61:14-30.

Li, J.Y. and G.A. Strobel. 2001. Jesteone and hydroxyl-jesterone antioomycete cyclohexenenone epoxides from the endophytic fungus *Pestalotiopsis jesteri*. **Phytochemistry** 57:261-265.

Lorian, V. 1996. **Antibiotic in Laboratory Medicine**. 3rd. William & Wikins, Baltimore.

Phongpaichit, S., N. Rungjindamai, V. Rukachaisirikul and J. Sakayaroj. 2006. Antimicrobial activity in cultures of endophytic fungi isolated from *Garcinia* species. **FEMS Immunology & Medical Microbiology** 48: 367-372.

Saikkonen, K. 2007. Forest structure and fungal endophytes. **Fungal Biology Review**. 2 : 67-74.

Schulz, B., C. Boyle, S. Draeger, A.K. Rommert and K. Hrohn. 2002. Endophytic fungi: a source of novel biologically active secondary metabolites. **Mycological Research** 106: 996-1004.

Strobel, G. 2003. Endophyte as sources of bioactive product. **Microbe and Infection** 5:535-544.

Strobel G. and B. Daisy. 2003. Bioprospecting for microbial endophytes and their natural products. **Microbiology and Molecular Biology Reviews** 67:491-502.

Strobel, G., X. Yang, X., J. Sears. R. Kramer, S.R. Sidh and W.M. Hess. 1996. Taxol from *Pestalotiopsis microspora*, an endophytic fungus of *Taxus wallichiana*. **Microbiology** 142:435-440.

Yu, H., L. Zhang, L. Li, C. Zheng, L. Guo, W. Li, P. Sun and L.Qin. 2010. Recent developments and future prospects of antimicrobial metabolites produced by endophyes. **Microbiological research** 165 : 437-449.

การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมีของสาหร่ายวากาเมะเค็มระหว่างการเก็บรักษา

Change of Physical and Chemical characteristics of Salted Wakame (*Undaria pinnatifida)* During Storage

ทิพยา สิทธิทูล[1*] และ วริพัสย์ อารีกุล[1]

Tippaya Sitthitool[1*] and Varipat Areekul[1]

บทคัดย่อ

ผลของอุณหภูมิ (5, 20 และ 30 องศาเซลเซียส) และสภาวะที่มืด/สว่าง ในการเก็บรักษาสาหร่ายวากาเมะต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมี และกายภาพ ตลอดระยะเวลา 5 เดือน พบว่า อุณหภูมิ แสงสว่าง และระยะเวลาการเก็บมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏ การเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมด ความแน่นเนื้อ และปริมาณคลอโรฟิลล์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ลักษณะปรากฏของสาหร่ายแสดงการเปลี่ยนแปลงสี และการสูญเสียความชุมน้ำอย่างมาก นอกจากนี้ การใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในสภาวะสว่าง มีผลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดเพิ่มขึ้นในขณะที่ความแน่นเนื้อลดลงในระหว่างการเก็บรักษา ในทางตรงกันข้าม ปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้นในเดือนที่ 2 จากนั้นค่อยๆ ลดลง จากผลการทดลอง การเก็บรักษาสาหร่ายวากาเมะเค็มที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ในที่มืด เป็นสภาวะที่ดีสามารถทดแทนการเก็บในสภาวะแช่แข็งได้

ABSTRACT

Effects of temperatures (5, 20 and 30°C) and dark/light condition on the physical and chemical characteristics of salted Wakame during 5 month storage were evaluated. It was found that temperature, dark/light and storage time statistically affected the visual appearance observation, total color difference (ΔE), firmness and chlorophyll content ($p \leq 0.05$). Their appearance considerably showed color change and loss of surface moist. In addition, higher temperatures in the light condition slightly affected more in changes. The ΔE increased while the firmness decreased during storage. In contrast, chlorophyll content increased in the second month, then gradually decreased. In our result, the good condition for storing salted Wakame is at 5°C in the dark condition which can be substituted for freezing storage.

Key Words : Wakame, Storage, chlorophyll content, Texture

* Corresponding author; e-mail address: tippaya_w@hotmail.com

[1] คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Faculty of Agro-Industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

คำนำ

สาหร่ายวากาเมะ (*Undaria pinnatifida)* เป็นสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล เติบโตได้ในน้ำทะเลที่มีอุณหภูมิเย็นปานกลางถึงเย็นมาก สามารถเก็บเกี่ยวได้ในเดือนกุมภาพันธ์ ถึง เมษายน ส่วนใหญ่พบในประเทศญี่ปุ่น เกาหลี และจีน ดังนั้นประเทศไทยจึงต้องนำเข้าสาหร่ายวากาเมะเพื่อเป็นวัตถุดิบในการประกอบอาหาร โดยเฉพาะอาหารญี่ปุ่นที่กำลังได้รับความนิยม เช่น สลัด ซุป ข้าวห่อสาหร่าย เป็นต้น สาหร่ายชนิดนี้มีสารอาหารที่สำคัญและมีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น โปรตีน วิตามิน กรดโฟลิก แคลเซียม ไอโอดีน เหล็ก และใยอาหาร เป็นต้น (Pereira, 2011)

จากข้อจำกัดของฤดูการเก็บสาหร่าย สาหร่ายชนิดนี้จึงนิยมใช้เกลือในการเก็บรักษา เพื่อให้สามารถเก็บไว้ได้นาน โดยการแช่ในน้ำเกลือ เข้มข้นประมาณร้อยละ 20 ข้ามคืน แล้วสะเด็ดน้ำเกลือ และบรรจุในบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้ Weihai Qingzheng Foods ผู้ผลิตสาหร่ายวากาเมะ ได้กำหนดให้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิแช่แข็ง ($\leq$ -18 องศาเซลเซียส) แม้ว่าผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความเข้มข้นเกลือสูงจัดเก็บที่อุณหภูมิห้อง เชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ก็ไม่สามารถเจริญได้ แต่การเก็บที่อุณหภูมิดังกล่าว อาจมีผลต่อลักษณะทางกายภาพ และการเปลี่ยนแปลงทางเคมี จนไม่เป็นที่ยอมรับ นอกจากนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการเก็บรักษาสาหร่ายยังมีจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีของสาหร่ายวาเมะดองเค็ม ที่สภาวะการเก็บรักษาต่างๆ

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างสาหร่ายวากาเมะ

นำตัวอย่างสาหร่ายวากาเมะเค็ม มาแบ่งบรรจุในถุงโพลิเอทีลีน (Polyethylene, PE) ความหนา 20 ไมครอน ขนาด 5X8 นิ้ว ถุงละ 200 กรัม

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของสาหร่ายวากาเมะเค็มในสภาวะการเก็บที่แตกต่างกัน

การทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบสปลิทพลอต (Split Plot Design) โดยมีปัจจัยหลักคือ ระยะเวลาในการเก็บรักษา และปัจจัยรอง 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิการเก็บรักษา 3 ระดับ (30±5 (อุณหภูมิห้อง), 20 (ห้องปรับอากาศ) และ 5 องศาเซลเซียส (ตู้เย็น) และสภาวะการให้แสง 2 แบบ (มืด และ สว่าง (ให้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ 10±2 ชั่วโมงต่อวัน)) จากนั้นสุ่มเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส และคลอโรฟิลล์ ทุกเดือน เป็นเวลา 5 เดือน โดยมีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

- ลักษณะปรากฏ

ตรวจลักษณะปรากฏภายนอกด้วยสายตา แล้วบันทึก ได้แก่ สีของสาหร่าย และ ลักษณะเส้น เป็นต้น

- ค่าสี

บดตัวอย่าง 50 กรัม ด้วยเครื่องบดอาหาร นาน 1 นาที แล้ววัดค่าสีจำนวน 5 ซ้ำ ด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab (ColorQuest® XE, Hunter Associates Laboratory, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา) ตามระบบ CIE L* a*b* โดยใช้โหมด Reflectance Specular Include (RSIN) ความสว่าง D65 observation 10° จากนั้นนำมาคำนวณและรายงานผลในค่าความแตกต่างของสี (Total Color Difference, ΔE) โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่าง ณ วันเริ่มต้น

- เนื้อสัมผัส (ดัดแปลงจาก Nayyar, 2016)

เป็นการวัดแรงตัดเฉือน (Cutting and Shearing) ด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA.TX.Plus ประเทศอังกฤษ) ใช้หัววัดแบบ Kramer Shear โดย ใส่ตัวอย่างในชุด mini Kramer Shear (น้ำหนักสาหร่าย 1 กรัม) โดยใช้ความเร็วของการวัดเป็น 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะในการตัด 2.5 เซนติเมตร ทำซ้ำ 10 ซ้ำ รายงานผลเป็นค่า Shear force (N)

- ปริมาณคลอโรฟิลล์ (ดัดแปลงจาก ธนิกพงศ์, 2555)

ตัวอย่างสาหร่ายบดละเอียด 0.5 กรัม สกัดตัวอย่างด้วยอะซิโตนความเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำตัวอย่างที่ได้ไปเก็บไว้ในที่มืด 2 ชั่วโมง แยกส่วนใสไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวช่วงคลื่น 645 และ 663 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโต้มิเตอร์ (Evolution 201, Thermo scientific, ประเทศสหรัฐอเมริกา) และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์ตามวิธีของ Mackinney (1941) ดังนี้

ปริมาณคลอโรฟิลล์ (ไมโครกรัมต่อกรัม) = $[0.999 \times Abs_{645})-(0.0989 \times Abs_{663})$

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Dancan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของสาหร่ายวากาเมะเค็มในสภาวะการเก็บที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาผลของสภาวะการเก็บต่อการเปลี่ยนแปลงของสาหร่ายวากาเมะเค็ม เป็นเวลา 5 เดือน ที่อุณหภูมิ 5, 20, และ 30 องศาเซลเซียส เก็บในที่สว่าง และที่มืด เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงด้านลักษณะปรากฏของสาหร่ายด้วยสายตาได้ผลดัง Table 1

Table 1 Visual appearance observation of salted wakame during storage

Storage periods (month)	Visual appearance observation	Light			Dark		
		5°C	20°C	30°C	5°C	20°C	30°C
0	Greenish	****	****	****	****	****	****
	Surface moist	+++	+++	+++	+++	+++	+++
1	Greenish	****	***	***	****	****	****
	Surface moist	+++	+++	+++	+++	+++	+++
2	Greenish	****	**	**	****	***	***
	Surface moist	+++	+++	++	+++	+++	++
3	Greenish	****	**	*	****	***	***
	Surface moist	+++	+++	++	+++	+++	++
4	Greenish	****	*	*	****	***	***
	Surface moist	+++	++	+	+++	++	+
5	Greenish	****	*	*	****	***	***
	Surface moist	+++	+	+	+++	+	+

**** Green, *** Light green, ** Light brown, * Brown +++ Moist, ++ Semi dry, + Dry

สภาวะการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสาหร่ายวากาเมะ แม้ว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ทั้งในที่มืดและสว่าง เป็นระยะเวลา 5 เดือน ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของสาหร่าย แต่การเก็บที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียสนั้น พบว่า สีของสาหร่ายเปลี่ยนแปลงไป โดยสาหร่ายมีสีเขียวอ่อนลงและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล อีกทั้งลักษณะชุ่มน้ำของสาหร่ายลงลด และผิวเริ่มแห้งขึ้น ตามระยะเวลาการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามสีของสาหร่ายที่เก็บในที่มืด จะเปลี่ยนแปลงช้ากว่าการเก็บในที่สว่าง ทั้งนี้อาจเนื่องจากแสงกระตุ้นการสลายตัวของคลอโรฟิลล์เป็นฟีโอไฟติน ทำให้สีเขียวเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล (Ríos *et al.,* 2014 ; Petrović *et al*., 2017) นอกจากนี้ การเก็บที่อุณหภูมิห้องอาจทำให้เกิดการระเหยของน้ำออกจากถุงที่บรรจุผลิตภัณฑ์ ส่งผลทำให้ความชุ่มน้ำของสาหร่ายลดลงตามระยะเวลาที่เก็บ ทั้งนี้บรรจุภัณฑ์ที่เป็นโพลิเอทีลีน (Polyethylene, PE) มีค่าการซึมผ่านน้ำที่ 0.25 ถึง 0.37 กรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวัน (Brody *et al.,* 2008)

ผลของสภาวะการเก็บต่อการเปลี่ยนแปลงด้านสีของสาหร่ายวากาเมะเค็ม

การเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ในสภาวะที่มืดและสว่าง (Figure 1) พบว่า ΔE มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บ โดยพบว่าในเดือนที่ 3–4 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทุกๆ ตัวอย่าง ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของสีของสาหร่ายในการเก็บในที่มืดและสว่างให้ผลใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าΔE นี้ให้ผลตรงกันข้ามกับลักษณะสีจากการสังเกตด้วยตา ที่พบว่า การเก็บในที่มืดจะเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่าการเก็บในที่สว่าง ส่วนอุณหภูมิในการเก็บรักษานั้น (Figure 1) พบว่าการเก็บที่อุณหภูมิต่ำมีค่า ΔE ต่ำกว่าการเก็บที่ในอุณหภูมิสูงกว่า ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากข้อมูลดิบ พบว่า ค่า b* ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงจากสีเขียว เป็นเหลืองมาขึ้น หรือ แสดงถึงการลดลงของคลอโรฟิลล์ ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยของ Paull and Chen (2008) ที่รายงานการเก็บรักษาสาหร่ายที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียสในที่สว่าง มีการเปลี่ยนแปลงของ ค่า b* มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า และสภาวะการเก็บรักษาที่ดีที่สุด คืออุณหภูมิ 15 ถึง 17 องศาเซลเซียสในที่มืด

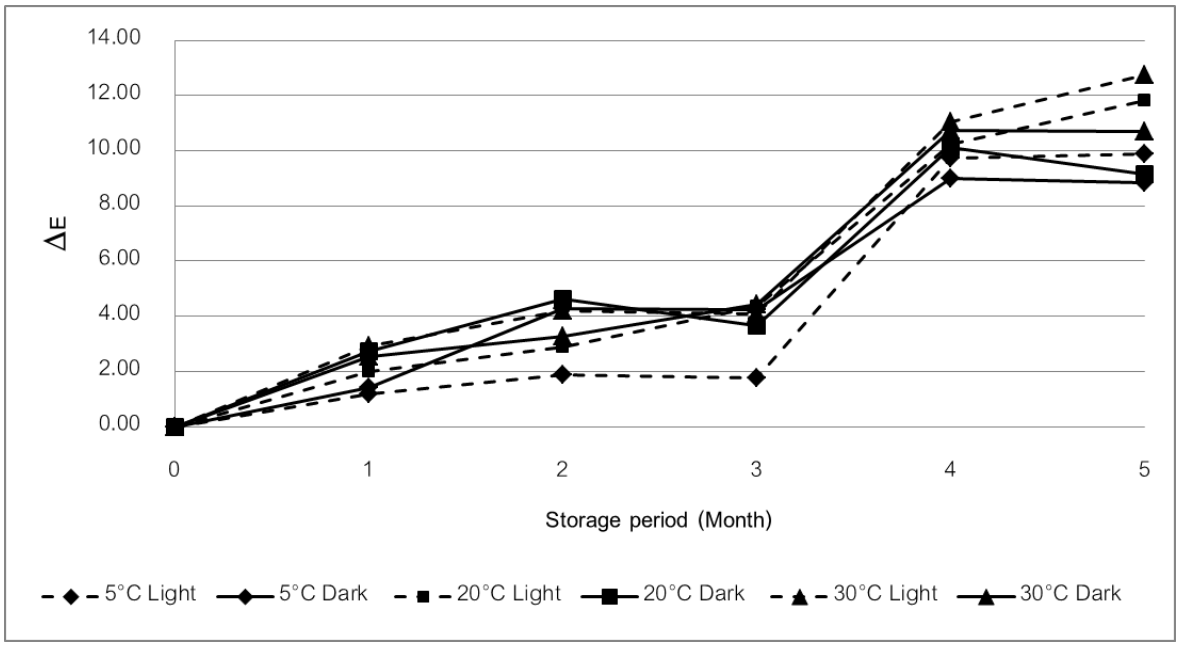


Figure 1 Effect of storage condition on color of salted Wakame during storage

ผลของสภาวะการเก็บต่อการเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสของสาหร่ายวากาเมะเค็ม

ค่าแรงเฉือน (shear force) เป็นค่าที่แสดงถึง ความแน่นเนื้อ (firmness) ของสาหร่าย โดยผลการทดลอง (Figure 2) พบว่า ค่าความแน่นเนื้อที่วันที่ 0 มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 554.37±10.04 นิวตัน เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเก็บ และอุณหภูมิการเก็บ ทำให้ความแน่นเนื้อของสาหร่ายมีแนวโน้มลดลงในเดือนที่ 1 จากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลา 2 ถึง 5 เดือน และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 409.87 ถึง 428.38 นิวตัน นอกจากนี้ยังพบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องทำให้ค่าความแน่นเนื้อของสาหร่ายมีแนวโน้มต่ำกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ ส่วนผลของแสงนั้นก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Paull and Chen (2008) ที่รายงานว่าความแน่นเนื้อของสาหร่ายมีค่าลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บ และ Nayyar (2016) รายงานว่า การเก็บสาหร่ายที่อุณหภูมิต่ำจะรักษาเนื้อสัมผัสของสาหร่ายได้ดีกว่าการเก็บที่อุณหภูมิสูง

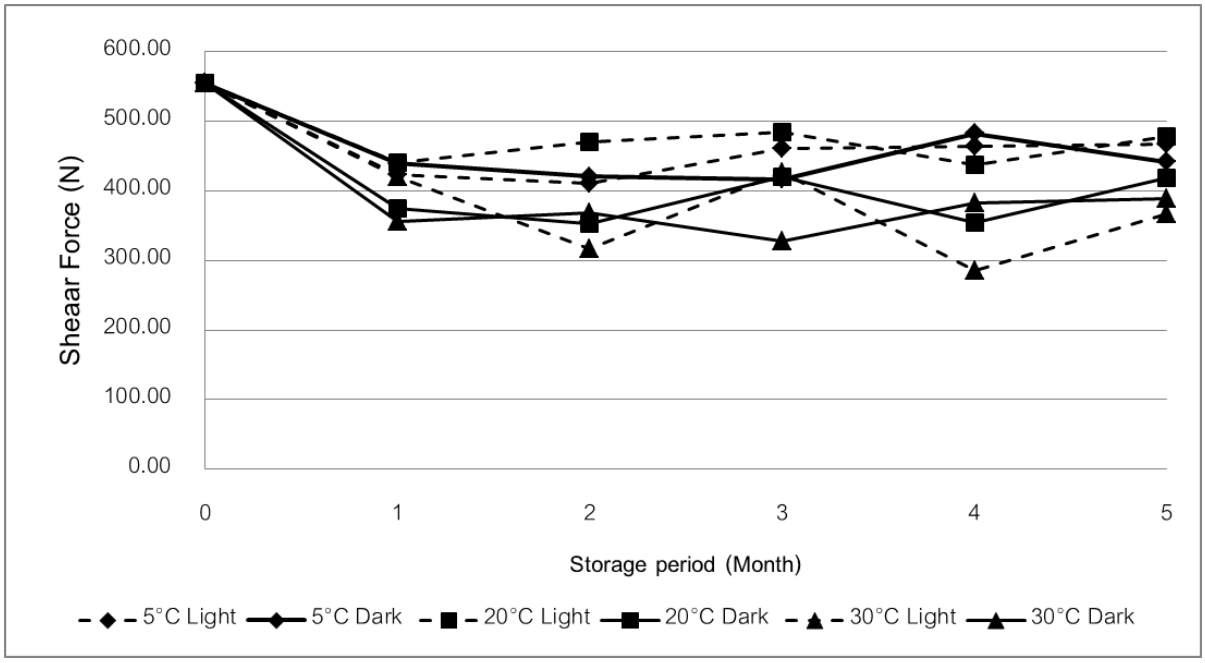


Figure 2 Effect of storage conditions on firmness of salted Wakame

ผลของสภาวะการเก็บต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายวากาเมะเค็ม

การเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอโรฟิลล์ในสาหร่ายเมื่อเก็บในสภาวะและระยะเวลาต่างกันแสดงดัง Table 2 พบว่าปริมาณของคลอโรฟิลล์ในทุกๆ ตัวอย่าง มีค่าเพิ่มขึ้นในเดือนที่ 2 ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอโรฟิลล์ในเดือนที่ 2 อาจเกิดจากการเสียสภาพของสาหร่าย ทำให้สามารถสกัดคลอโรฟิลล์ออกมาจากตัวอย่างได้ดีขึ้น สอดคล้องกับการลดลงของค่าความแน่นเนื้อที่แสดงถึงการลดลงของความแข็งแรงของผนังเซลล์สาหร่าย

ภายหลังจากเดือนที่ 2 จนสิ้นสุดการทดลอง พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์จะค่อยๆ ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Petrović *et al.* (2017) ที่รายงานว่าการสลายตัวของคลอโรฟิลล์เป็นฟีโอไฟตินซึ่งเป็นสารประกอบสีน้ำตาล เกิดจากเอนไซม์ อุณหภูมิ แสง และออกซิเจน (Vergara-Domínguez *et al.*, 2016) นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิในที่สว่างจะเร่งการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ทำให้สาหร่ายมีสีเขียวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าสี (ΔE) และ ค่า b* ที่เพิ่มขึ้น

Table 2 Effect of storage conditions on chlorophyll content of salted Wakame

Storage Temperature (°C)	Light	Storage period (month)	chlorophyll content (mg/g)
-	-	0	0.07 ± 0.00^{hi}
5	Light	1	0.08 ± 0.03^{hi}
		2	$0.22\pm0.04^{a-c}$
		3	$0.16\pm0.01^{c-f}$
		4	0.09 ± 0.03^{hi}
		5	$0.12\pm0.06^{e-h}$
	Dark	1	$0.10\pm0.04^{g-i}$
		2	$0.21\pm0.02^{b-d}$
		3	$0.19\pm0.00^{b-d}$
		4	0.09 ± 0.01^{hi}
		5	0.15±0.03
20	Light	1	0.06 ± 0.02^{i}
		2	$0.22\pm0.05^{a-c}$
		3	$0.21\pm0.03^{b-d}$
		4	0.06 ± 0.00^{i}
		5	0.06 ± 0.02^{i}
	Dark	1	0.07 ± 0.03^{hi}
		2	0.23 ± 0.01^{ab}
		3	$0.19\pm0.04^{b-d}$
		4	0.07 ± 0.00^{hi}
		5	$0.10\pm0.01^{g-i}$
30	Light	1	0.06 ± 0.00^{i}
		2	0.27 ± 0.00^{a}
		3	$0.18\pm0.03^{b-e}$
		4	0.07 ± 0.02^{hi}
		5	$0.10\pm0.06^{g-i}$
	Dark	1	0.06 ± 0.01^{i}
		2	0.24 ± 0.00^{ab}
		3	$0.18\pm0.04^{b-e}$
		4	$0.10\pm0.06^{g-i}$
		5	$0.11\pm0.03^{f-i}$

Notes with the same superscript letter within the same column were not significantly different at a level of 95%.

สรุป

อุณหภูมิ และแสงสว่าง มีแนวโน้มต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ และเคมีตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยการเก็บที่อุณหภูมิห้อง หรือในที่สว่าง มีแนวโน้มให้ ΔE เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณคลอโรฟิลล์ และความแน่นเนื้อลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าสาหร่ายเปลี่ยนสีจากสีเขียวเข้มเป็นสีน้ำตาลอ่อน และความชุ่มน้ำลดลง ทั้งนี้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บรักษาสาหร่ายวากาเมะ ได้แก่ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสในที่มืด อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องศึกษาด้านจุลินทรีย์ และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อยืนยันความปลอดภัยของสินค้าต่อไป

เอกสารอ้างอิง

ธนิกพงศ์ ครองข้าวนาสาร. 2555. การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี คลอโรฟิลล์ และใยอาหาร ของต้นทานตะวันงอก. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Brody, A.L. Bugusu, B. Han, J.H. Sand, C.K. and Mchugh, T.H. 2008. Innovative food packaging solutions. Journal of food science 73: 107-116.

Nayyar, D. 2016. Refrigerated shelf-life evaluation and effects of minimal processing on antioxidant capacity of fresh sea vegetables from New England. M.S. Thesis, University of Maine.

Mackinney, G. 1941. Absorption of light by chlorophyll solutions. The division of fruit products, University of California, Berkeley.

Paull, R.E. and Chen. N.J. 2008. Postharvest handling and storage of the edible red seaweed *Gracilaria*. Postharvest Biology and Technology 48: 302–308.

Pereira, L. 2011. A review of the nutrient composition of selected edible seaweeds. Nova Science Publishers :15-47.

Petrović, S. Zvezdanović and J. Marković D. 2017. Chlorophyll degradation in aqueous mediums induced by light and UV-B irradiation: An UHPLC-ESI-MS study. Radiation Physics and Chemistry 141:8–16.

Ríos, J.J. Pérez-Gálvez and A. Roca, M. 2014. Non-fluorescent chlorophyll catabolites in quince fruits. Food Research International 65: 255–262.

Vergara-Domínguez, H., Ríos, J.J., Gandul-Rojas, B. and Roca, M. 2016. Chlorophyll catabolism in olive fruits (var. Arbequina and Hojiblanca) during maturation. Food Chemistry 212: 604–611.

การวิเคราะห์ตัวอย่างทางธรณีวิทยาแบบไม่ทำลายตัวอย่างเพื่อใช้ประกอบการสืบสวนทางนิติวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์

Non-destructive Analysis in Geological Samples for Investigation on Various Aspects of Nuclear Forensics

ลฎาภา ศรีจิตตะวา[1*] อารีรักษ์ เรือนเงิน[1] หริเนตร มุ่งพยาบาล[1] และ ธงชัย สุดประเสริฐ[1]

Ladapa Srijittawa[1*], Areerak Rueanngoen[1], Harinate Mungpayaban[1] and Thongchai Soodprasert[1]

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ตัวอย่างทางธรณีวิทยาแบบไม่ทำลายตัวอย่างเป็นเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ประกอบการสืบสวนทางนิติวิทยาศาสตร์ โดยมีเครื่องมือหลากหลายชนิดที่มีคุณภาพสูงที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบและหาโครงสร้างของตัวอย่างได้อย่างถูกต้องแม่นยำ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลทางนิติวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์เพื่อสืบหาความเชื่อมโยงระหว่างบุคคล สถานที่ และอื่นๆ ก่อน และหลังเกิดเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนิวเคลียร์และรังสี ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างดินจำนวน 30 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Gamma Spectrometry) GEM Series HPGe, High Purity Gemaniumพบนิวไคลด์ (กัมมันตรังสี Th-234 Ra-226 และBi-214 ที่เกิดอยู่ตามธรรมชาติและจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction)XRD, D2 Phaser พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกหลักคือ (Quartz และนอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer)XRF, S1 TITAN) แสดงธาตุองค์ประกอบหลักคือ Si และ Al

ABSTRACT

Non-destructive analysis (NDA) technique is the one population to use in nuclear forensic investigation using various high-quality instruments to identify radionuclide chemical composition and crystal structure. The NDA results and databases were used to interpret the history finding of evidences; the correlation among persons, places and others. The conclusion of nuclear forensics investigation served previous and after circumstances relating to nuclear security event. In this research, 30-soil samples were analyzed using Gamma Spectrometry (GEM Series HPGe, High Purity Gemanium). Th-234 Ra-226 and Bi-214 were found. In addition, all samples contained quartz as a main crystal structure which were confirmed with main chemical composition of Si and Al using and X-ray fluorescence technique.

Key Words: X-ray diffraction (XRD D2 Phaser), X-ray fluorescence spectrometer (XRF), Gamma Spectrometry, Myla,Pestle &Mortar porcelain

* Corresponding author; e-mail address: **ladapa.s@oap.go.th**

[1]กองพัฒนาระบบและมาตรฐานกำกับดูแลความปลอดภัย สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติกรุงเทพฯ 10900

[1]Technical Support Division, Office of Atoms for Peace, Bangkok 10900

คำนำ

ดินมีส่วนประกอบที่เป็นแร่ธาตุที่แตกต่างกัน เช่น ทราย โคลน เนื้อดิน ออกไซด์ สารออร์แกนนิก และสารไมโครออร์แกนนิค เป็นต้น ดินมีความซับซ้อนในเชิงชีววิทยา เคมี ฟิสิกส์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นจึงใช้ดินเป็นวัสดุในการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานและการเคลื่อนที่ ส่วนสีของดินนั้นสามารถนำมาบ่งชี้ถึงประวัติของส่วนประกอบในดินได้เป็นอย่างดี เช่น ดินสีขาว และสีเทาจะหมายถึงดินที่ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ ดินสีเทา และดินสีดำหมายถึงดินที่มีวัสดุอินทรีย์ หรือน้ำเป็นองค์ประกอบ ส่วนดินสีแดง สีน้ำตาล และสีเหลืองนั้นแสดงว่ามีเหล็กผสมอยู่ เป็นต้น ดินนั้นมีความสำคัญต่อมนุษย์มากมาย อาทิเช่น เป็นผืนดินปลูกสร้างที่อยู่อาศัย เป็นแหล่งเพาะปลูก เลี้ยงสัตว์ รวมทั้งสิ่งปลูกสร้างบางประเภท

นับเป็นเวลาหลายร้อยปีมาแล้วที่ใช้ดินเป็นหลักฐานในการสืบสวนสอบสวนในคดีอาชญากรรม ซึ่งดินสามารถใช้เป็นหลักฐานทางกายภาพได้ อาทิเช่น หลักฐานจากดินใช้เป็นส่วนช่วยในเรื่องของการข่าว เพื่อการดำเนินคดีเกี่ยวกับเรื่องของยาเสพติด การใช้ข้อมูลจากดินในการตรวจสอบถึงเส้นทางในการขนส่งเพื่อเชื่อมโยงไปถึงบุคคลที่ก่อคดีอาชญากรรม เนื่องจากดินมีคุณลักษณะซับซ้อนจึงสามารถที่จะดูลักษณะ ทางกายภาพได้ เช่น ขนาดของอนุภาค และความหนาแน่น เป็นต้น นอกจากนี้ ความหลากหลายของดินยังเป็นผลสืบได้ไปถึงกระบวนการของต้นกำเนิดของดินได้ โดยการสืบเสาะลักษณะของดินสามารถดูได้จากแผนที่ทางภูมิศาสตร์ สภาพอากาศ ประสบการณ์ของผู้สืบค้น พืช และไมโครชีววิทยา สภาพน้ำ และกิจกรรมของมนุษย์ นอกจากนี้การตรวจสอบซากพืชซากสัตว์ในดินยังมีความซับซ้อนมาก ซึ่งในเชิงนิติวิทยาศาสตร์ผู้ตรวจสอบดินจะต้องเป็นผู้ที่มีความเชี่ยวชาญ มีความรู้ในการตรวจสอบ และมีประสบการเกี่ยวกับการวิเคราะห์ดินเพื่อที่จะใช้ดินเป็นหลักฐานในการตัดสินคดีอาชญากรรมที่มีการฟ้องร้องเกิดขึ้นได้(Lyon, France, October 16-19 2001)

นิติวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์)Nuclear Forensics (เป็นการสืบหาความเชื่อมโยงระหว่างบุคคล สถานที่ และข้อมูลอื่นๆ ทั้งก่อนและหลังการเกิดเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนิวเคลียร์และวัสดุกัมมันตรังสีซึ่งอยู่นอกเหนือการกำกับดูแล ซึ่งประกอบด้วย ส่วนหลัก คือการบริหารจัดการสถานที่เกิดเหตุ และการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ทางนิวเคลียร์และรังสี โดยนิติวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์เป็นกระบวนการที่สำคัญในการป้อมปรามป้องกัน และยับยั้ง ไม่ให้ผู้ประสงค์ร้ายกระทำการก่อการร้ายได้สำเร็จ ดังนั้นการวิเคราะห์ดินเพื่อสนับสนุนงานนิติวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ จะเป็นการวิเคราะห์ในเชิงวิทยาศาสตร์เพื่อช่วยสนับสนุนงานด้านการสืบสวนสอบสวนเส้นทางที่มีการลักลอบวัสดุกัมมันตรังสี และวัสดุนิวเคลียร์ที่ผิดกฎหมาย โดยดินจะมีลักษณะเหมือนกับลายนิ้วมือตรงที่มีอยู่หลายชนิด ซึ่งมีคุณสมบัติที่จะสามารถตรวจพิสูจน์เพื่อการบ่งชี้ถึงที่มาของดินได้ รวมถึงใช้เป็นกุญแจสำคัญในการตอบคำถามที่เกี่ยวข้องโยงไปยังวิธีการสุ่มตัวอย่าง การบ่งบอกถึงรายละเอียดของดิน กระบวนการการก่อรูปของดิน รวมถึงคุณภาพ ขอบเขต การแพร่หลาย การกระจายตามพื้นที่ และการตีความเกี่ยวกับดินโดยใช้เครื่องมือที่มีเทคโนโลยีขั้นสูงแบบไม่ทำลายตัวอย่าง เช่นเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน)X-ray diffraction, XRD) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray fluorescencespectrometer, XRFและเครื่องแกมมาส (เปคโตรเมทรี)Gamma Spectrometry, HPGeโดยเครื่องมือเหล่านี้สามารถใช้บ่งบอกได้ทั้งปริมาณ และ (คุณภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวมทั้งปราศจากการเตรียมตัวอย่างที่มีความยุ่งยากซับซ้อน ตลอดจนข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลทางนิติวทยาศาสตร์นิวเคลียร์ที่มีอยู่ เพื่อประเมินถึงแหล่งที่มาได้ในเบื้องต้น ทั้งนี้หากต้องการวิเคราะห์ในเชิงลึกต้องอาศัยเครื่องมือวิเคราะห์และการเตรียมตัวอย่าง

หลายขั้นตอน โดยงานศึกษาวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ตัวอย่างดินจากกรมทรัพยากรธณีทั้งหมด (Fitzpatrick RW 2009)

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

อบตัวอย่างดินที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจากนั้นนำตัวอย่างดินใส่ตู้ดูดความชื้น นำตัวอย่าง
ดินที่อบแห้งแล้วไปบดให้ละเอียดโดยใช้โกร่งบดสาร นำตัวอย่างที่บดแล้วใส่ในกระปุกที่มีฝาปิดสนิท ทำการวิเคราะห์
หานิวไคลด์กัมมันตรังสี เช่น U Th และ Bi เป็นต้น ด้วยเครื่อง Gamma Spectrometry (GEM Series HPGe, Gemanium) และ นำตัวอย่างที่บดแล้วใส่ในSample Holder วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD D2 Phaser) และเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer)Handheld (XRF S1 TITAN) (Fitzpatrick RW 2009)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gamma Spectrometry) GEM Series HPGe, High Purity Gemanium(

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินด้วยเครื่อง Gamma Spectrometry พบว่าในตัวอย่างดินทั้ง ตัวอย่าง 30 ประกอบด้วยK-40 ซึ่งเป็นนิวไคลด์ที่มีอยู่ในธรรมชาติและนิวไคลด์ที่อยู่ในอนุกรมยูเรเนียม)U-238 decay series ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ (Th-234 Ra-226 และBi-214 จากผลการวิเคราะห์พบว่าเครื่องGamma Spectromertryจะทำการตรวจวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีซึ่งเป็นนิวไคลด์ที่ไม่เสถียร

Table 1 The spectra of soil analysis with Gamma Spectrometry

Spectra	Energy(keV)	Net area
Th-234	63.54	927
Ra-226	185.92	4663
Bi-214	608.54	11058
K-40	1460.62	11583

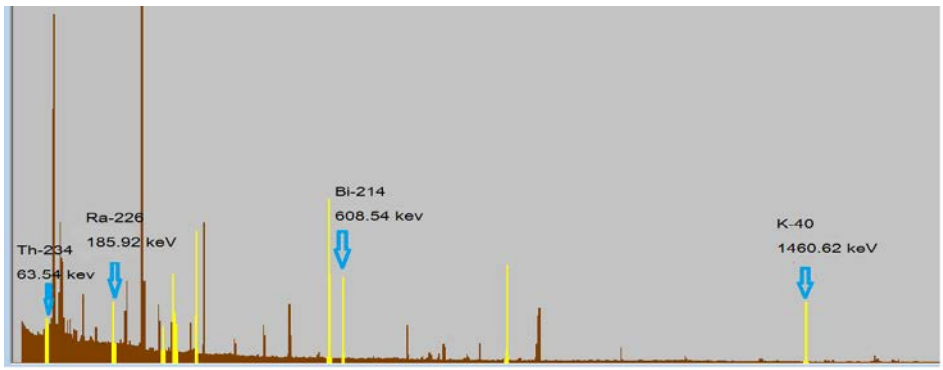


Figure 1 Gamma spectrometry spectra in soil

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน)XRD Bruker D2 Phaser(

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของดิน ตัวอย่าง พบว่าองค์ประกอบหลัก 30 ของดินทั้งหมดที่นำมาศึกษามีโครงสร้างผลึกหลักคือQuartz (SiO_2) ส่วน Microcline สามารถพบได้ในตัวอย่างดินทั้งหมดยกเว้นตัวอย่างที่ นอกจากนี้ยังพบโครงสร้ 19 และ 4างผลึกแบบ Albite Muscovite Permingeatite Illite และ Ramsbeckite แสดงว่าเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันสามารถทำการหาโครงสร้างผลึกขององค์ประกอบของตัวอย่างดินที่มีความเสถียร ดังแสดงในตารางที่ 2

Table 2 The structure of Crystal of soil Analysis with X-ray diffraction

Sample no.	Crystal Structure						
	Quartz[1]	Microcline[2]	Albite[3]	Muscovite[4]	Permingeatite[5]	Illite[6]	Ramsbeckite[7]
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	✓	✓	✓

1 Quartz = $SiO_2$2 Microcline = $Al_2O_3$3 Albite = $NaAlSi_3O_8$4Muscovite = $KAl_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$

5 Permingeatite =$Cu_3SbSe_4$6 Illite) =$K,H_{30}(Al_2)Si_3Al(O_{10})OH$(× H_2O

7 Ramsbeckite =$Cu_{15})OH(_{22})SO_4(_4)H_2O_6$

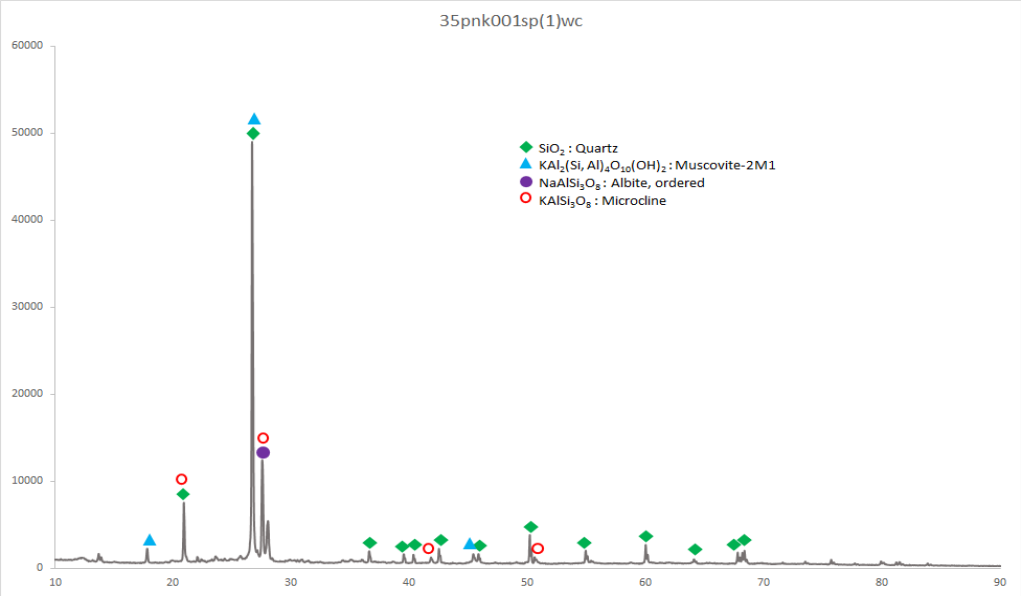


Figure 2X-ray diffraction spectra in soil

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer)Handheld (XRF S1 TITAN(

จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง handheld X-ray Analyzer พบว่า ตัวอย่างดินทั้ง 30 ตัวอย่างมีธาตุ Al และ Si เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งผลการวิเคราะห์ มีความสอดคล้องกับเครื่อง X-ray diffraction แสดงว่าเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer เป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำสามารถที่จะทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวอย่างได้อย่างถูกต้อง ดังแสดงในตารางที่3

Table3 Soil analysis by Handheld X-ray Analyzer

Sample No.	Chemical Composition(%)				
	Al	Ca	K	Si	Fe
1	9.92	0.41	3.5	31.87	1.91
2	11.71	0.22	3.62	30.52	1.57
3	11.4	1.53	3.97	29.79	1.57
4	8.87	0.17	5.7	36.06	0.58
5	9.1	0.14	4.77	35	1.11

6	13.63	0.15	4.01	30.15	1.37
7	10.67	0.27	5.31	32.09	1.08
8	9.12	0.57	3.65	32.98	2.13
9	7.83	0.38	4.65	36.59	1.18
10	10.18	0.4	4.06	32.31	2.95
11	9.59	0.41	4.21	31.92	1.63

Sample No.	Chemical Composition(%)				
	Al	Ca	K	Si	Fe
12	8.45	0.24	3.79	34.23	1.75
13	8.58	0.36	4.35	34.7	1.32
14	5.89	0.15	3.91	39.24	0.89
15	7.85	0.27	4.3	36.44	1.28
16	8.95	0.24	4.47	34.83	1.91
17	7.79	0.18	5.11	37.38	1.25
18	8.97	0.37	4.6	34.6	1.45
19	12.27	0.06	0.83	28.86	1.58
20	10.9	0.05	3.35	33.23	1.34
21	9.5	0.1	3.63	31.63	1
22	8.7	0.37	4.81	32.85	1.27
23	9.02	0.3	4.49	33.04	1.69
24	10.69	0.06	2.81	31.08	2.56
25	8.24	0.23	4.49	34.85	1.34
26	7.52	0.21	5.78	37.55	1.12
27	7.63	0.27	4.01	38.31	1.13
28	8.76	0.33	5.45	35.69	1.4
29	7.66	0.18	4.9	37.53	1.32
30	9.43	0.24	5.68	35.4	1.41

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์Handheld XRF S1 TITANกับฐานข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวอย่างดินสามารถจำแนกกลุ่มตามชนิดของโครงสร้างผลึกที่เป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 4

Table4 Soil categorization by the structure of crystal

Group	Crystal Structure	Sample no.
A	Quartz, Microcline, Albite, Muscovite	1
B	Quartz, Microcline, Muscovite	2, 3, 5, 6, 10
C	Quartz, Albite	4

D	Quartz, Microcline, Permingeatite	7
E	Quartz, Microcline	8, 9,11, 12, 13, 14, 15, 17, 21, 23, 24, 26, 27, 29
F	Quartz, Microcline, Albite	16, 18, 22, 25,28,30
G	Quartz, Ramsbeckite	19
H	Quartz, Microcline,Permingeatite, Illite	20

จากนั้น นำกลุ่มของตัวอย่างดินที่ได้จากตารางที่ 3 มาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลทางนิติวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์พบว่ามีความใกล้เคียงกัน ยกเว้นในกลุ่ม G ซึ่งมีผลของ K ที่ต่างจากฐานข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้ต้องอาศัยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ที่ได้ เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องHandheld X-ray Analyzer เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของธาตุในเบื้องต้นเท่านั้น

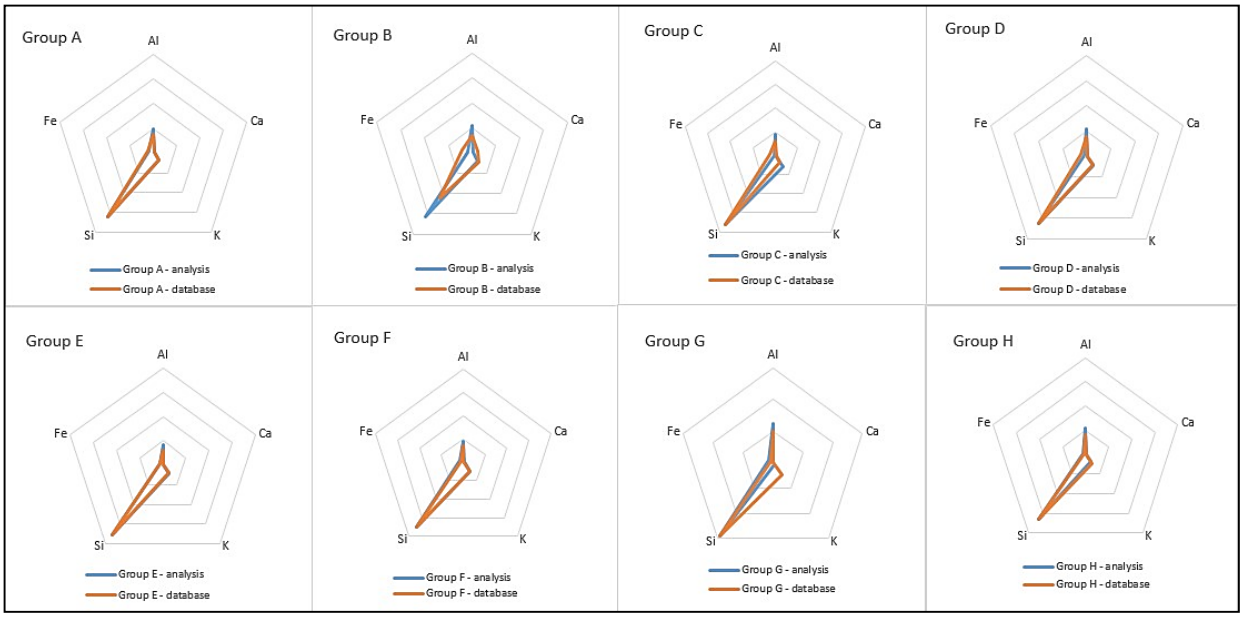


Figure 3 The comparision of the result betweensoil analysisand nuclear forensics datebase

สรุป

การวิเคราะห์ตัวอย่างดินแบบไม่ทำลายด้วยเครื่องแกมมาสเปกโทรเมทรี เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน และเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์เป็นการวิเคราะห์เบื้องต้นในกระบวนการวิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ที่สะดวกและรวดเร็วเพราะไม่ต้องอาศัยการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่างนี้จะถูกใช้เพื่อนำไปวางแผนในการวิเคราะห์กระบวนการทางนิติวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์เชิงลึกด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ที่ให้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูงกว่าได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมทรัพยากรธรณีที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างดิน รวมทั้งนักศึกษาฝึกงานภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ช่วยให้การวิเคราะห์สำเร็จไปได้ด้วยดี ดังนี้คือ

1. นายณัฐพล เต็งทอง

2. นายพรพิพัฒน์ เขียวมณี

3. นายสิทธิชัย อายุวัฒน์

เอกสารอ้างอิง

Fitzpatrick RW 2009 (**Soil :Forensic Analysis** .In Wiley Encyclopedia of Forensic Science)Editors-In-Chief : A Jamieson and A Moenssens .(John Wiley & Sons, Ltd .The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Susser, P019 8SQ, United Kingdom .

Yoshiteru Marumo **Forensic Examination of Soill Evidence .** National Research Institute of Police Science 6-3-1, Kashiwanoha, Chiba 277-0882, Japan) Received 18November 2002:accepted 25 November 2002(

Lyon Forensic **Forensic Examination of Soill Evidence .** 13th Interpol Forensic Science Symposium, Lyon, France, October 16-19 2001

Lorna Dawson **Soil Forensic Services :Methods used in soil analysis)case studies(** Head of Forensic Soil Science, July 2013

R.W.Fitzpatrick and M.D .Raven**Guidelinesfor Conducting Criminal and Environmental Soil Forensic Investigation :Version 10.1** Centre for Australian Forensic Soil Science)CAFSS(

Michael J. Kristo, Amy M. Gaffney, Naomi Marks, Kim Knight, William S, Cassata, and Ian D. Hutcheon

Nuclear Forensic Science: Analysis of Nuclear Material Out of Regulatory Control

IAEA TECDOC-1820 **Identification of High Confidence Nuclear Forensics Signatures**Results of a Coordinated Research project and Related Research

L.Colletti, L.Ortega, K.Hayenes, P.Mason, R.Essex, K.Kuhn, L.Tandon **Challenges in Bulk Nuclear Forensics Sample Analysis**

E. Keegan, M.Kristo, M.Colella,M.Robel, R.Williams, R.Lindvall, G.Eppich, S.Roberts,L.Borg, A.Gaffney, J.plane, H.Wong,J.Davis, E.Loi, M.Reinchard, I.Hutcheon **Nuclear Forensic Analysis of an Unknown Uranium Ore Concentrate Sample Seized in a Criminal Investigation in Australia**

การใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัดเซริซินจากรังไหมร่วมกับการใช้สารสกัดจากใบหม่อนเป็นตัวทำละลายในการสกัด ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Ultrasound-assisted extraction of sericin from silk cocoon combined with mulberry leaves extracts solvent as an environmentally friendly process.

ธัญพรรณ ฮ่อบรรทัด[1*]

Thanyapan Hobanthad[1*]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการสกัดเซริซินจากรังไหม โดยใช้สารสกัดจากใบหม่อนเป็นตัวทำละลายร่วมกับการใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัด โดยศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสกัด พบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของสารละลายใบหม่อนที่ 1 % w/v ให้ปริมาณเซริซินมากที่สุด เท่ากับ 4.6 ± 0.4 % w/w เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเซริซินที่สกัดโดยใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัดและการสกัดด้วยตัวทำละลายพบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และศึกษาคุณลักษณะของผงเซริซนที่สกัดด้วย FTIR พบว่าผงเซริซินที่สกัดด้วยสารสกัดจากใบหม่อนให้สเปกตรัมที่ไม่แตกต่างจากเซริซินมาตรฐาน นอกจากนี้ศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ABTS และ FRAP พบว่าค่า IC_{50} เท่ากับ 0.71 (DPPH) ให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 0.38 ± 0.02 (mmol TE/gDW) (ABTS) และความสามารถในการริดิวซ์เฟอร์ริกของผงเซริซินเท่ากับ 32.9 ± 1.4 (μmol $FeSO_4$/gDW) และเมื่อเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผงเซริซินที่สกัดโดยการใช้อัลตราซาวด์และสกัดด้วยตัวทำละลายปกติ พบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการสกัดเซริซินด้วยสารสกัดจากใบหม่อนยังเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจากไม่ใช้สารเคมี และให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าตัวทำละลายชนิดอื่นๆ

ABSTRACT

The aims of this research is to study the extraction of sericin from silk cocoons by using mulberry leaves extract as a solvent combined with ultrasound-assisted extraction. The optimal conditions has been investigated. The high sericin yield (4.6 ± 0.4 % w/w) was extracted when using 1% w/v mulberry leaves extracts as a solvent at 60 °C for 30 min. The comparison of extraction methods (ultrasound-assisted (UAE) and solvent extraction (SE)) on the yield were studied which indicated that the sericin yield from two methods did not significantly different. The FTIR spectrum of sericin powder was compared with standard sericin which shown the same spectra. In addition, the antioxidant activity of sericin powder was analyzed by DPPH, ABTS and FRAP assay. The IC_{50} of sericin powder is 0.71 (DPPH), the antioxidant activity by ABTS assay is 0.38 ± 0.02 (mmol TE/gDW), the ferric reducing ability power is 32.9 ± 1.4 (μmol $FeSO_4$/gDW) and it not significantly different with sericin powder from SE. However, mulberry leaves extract is the good way to use as solvent extraction because of it is free from chemical and produced the highest antioxidant activity.

Key Words :sericin, silk degumming, extracted mulberry leaves

* Corresponding author; e-mail address: **thanyapan.ht@bru.ac.th**

[1]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ บุรีรัมย์ 31000

[1]Department of Chemistry, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University, Buriram 31000

คำนำ

ผ้าไหมนับเป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์ของไทยที่มีมูลค่า ทั้งในแง่ของการส่งออกและการซื้อขายในประเทศ ส่งผลให้เกิดกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตผ้าไหม่ทั้งขนาดกลาง และขนาดย่อม กระจายตัวอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ กระบวนการผลิตผ้าไหมในแต่ละท้องถิ่นจะมีเทคนิคและวิธีการที่เป็นเอกลักษณ์ อันเกิดจากการสั่งสมภูมิปัญญาท้องถิ่น และปรับปรุงคุณภาพผ้าไหมจากประสบการณ์ที่ยาวนาน อย่างไรก็ตามในสภาวการณ์ปัจจุบันที่สังคมให้ความสำคัญกับสุขภาพและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากซึ่งขัดกับกระบวนการผลิตผ้าไหมที่ยังคงใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตในหลายขั้นตอน ไม่ว่าจะเป็นการใช้สีเคมีในการย้อม หรือกระบวนการลอกกาวไหมซึ่งต้องใช้เบสเป็นส่วนสำคัญในการลอกและปล่อยของเสียลงสู่ธรรมชาติโดยขาดการบำบัด ทั้งที่จริงสารละลายจากการลอกกาวไหมมีเซริซินซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีประโยชน์ สามารถเพิ่มมูลค่าได้ ในปัจจุบันมีการนำเซริซินไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเครื่องสำอาง (Patel *et al*., 2011) เนื่องจากเซริซินเป็นโปรตีนที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (Kitisin *et al.,* 2013) สามารถจับกับเคราตินของผิวหนัง และเส้นผม ป้องกันและดักเก็บความชื้น ทำให้ผิวชุ่มชื้นและอ่อนนุ่ม (เสาวนีย์ และหทัยชนก, 2549) นอกจากนี้เซริซินยังมีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาอีก เช่น ต้านการแข็งตัวของลิ่มเลือด เป็นสารต่อต้านการก่อมะเร็ง และยังสามารถยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ไทโรซิเนส ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์เมลานิน (Padamwar, 2004)

ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาวิธีในการสกัดเซริซิน (ลอกกาวไหม) ที่สามารถนำเซริซินไปใช้ประโยชน์ต่อได้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยผู้วิจัยเลือกใช้อัลตราซาวด์หรือคลื่นเสียงอัลตราโซนิกมาช่วยในการสกัดเนื่องจากคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากอย่างรวดเร็ว เมื่อฟองอากาศยุบตัวแตกออกจะเกิดแรงดันของของเหลวซึ่งมีความดันสูง ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดให้ดีขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นคลื่นเสียงที่ค่อนข้างปลอดภัย ไม่ก่อมลภาวะ และเครื่องมือมีราคาถูก (ชูชาติ, 2544) นอกจากนี้ยังเลือกใช้สารสกัดจากใบหม่อนเป็นตัวทำละลายในการสกัดแทนเบสที่ใช้ในอุตสาหกรรมไหมในปัจจุบัน เนื่องจากสารละลายใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส และฤทธิ์ต้านการอักเสบ (ปัญญดา และคณะ, 2556) จากคุณประโยชน์ของสารสกัดจากใบหม่อนดังกล่าว หากนำมาใช้สกัดเซริซินจะได้สารสกัดที่ปลอดภัย ไม่เป็นพิษ ส่งเสริมคุณสมบัติทางเภสัชวิทยาที่ดีให้กับเซริซินที่สกัดได้ นำเซริซินไปใช้ต่อได้โดยไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์หรือขั้นตอนการบำบัดเพิ่มเติม และไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเซริซินโดยใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัดเซริซินจากรังไหมร่วมกับการใช้สารสกัดจากใบหม่อนเป็นตัวทำละลายในการสกัด และศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของเซริซินที่สกัดได้เปรียบเทียบกับวิธีการสกัดเซริซินแบบดั้งเดิมคือต้มด้วยน้ำร้อน ใช้เบสลอกกาวไหมสำเร็จรูป และการใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวทำละลายในการสกัด

อุปกรณ์และวิธีการ

ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดเซริซิน

ตัวอย่างรังไหมพันธุ์เหลืองไพโรจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ และตัวอย่างใบหม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ 60 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมโดยการใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัด (ultrasound-assisted extraction; UAE) ซึ่งได้ศึกษาผลของเวลาในการสกัดที่ 20 30 40 50 และ 60 นาที ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดที่ 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายใบหม่อน (M) ที่ใช้ในการสกัดเซริซินที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 5 และ 10 โดยมวล

ต่อปริมาตร ซึ่งเตรียมโดยนำใบหม่อนมาอบให้แห้งและบดให้ละเอียด 10 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แช่ไว้เป็นเวลา 1 วัน และเปรียบเทียบปริมาณเซริซินที่สกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำร้อน (W) ใช้เบสลอกกาวไหมสำเร็จรูป (B) และการใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (S) นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบผลของกระบวนการสกัดระหว่างการใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัด และการสกัดด้วยตัวทำละลายปกติ (solvent extraction; SE) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

การหาปริมาณโปรตีนและร้อยละของการลอกกาวไหม

การหาปริมาณโปรตีนโดย Bradford assay (Bradford, 1976) โดยเปรียบเทียบและหาความเข้มข้นของโปรตีนที่สกัดได้กับกราฟมาตรฐานที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของซีรัมอัลบูมินที่ความเข้มข้น 125 250 500 1,000 และ 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยผสมตัวอย่างกับ Bradford Reagent ในอัตราส่วน 1 ต่อ 50 บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ด้วยอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์บริษัท PG Instruments รุ่น T60 จากนั้นนำค่าความเข้มข้นที่ได้รายงานผลปริมาณโปรตีนที่สกัดได้ในรูปของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักรังไหม

ร้อยละของการลอกกาวไหมหาได้จากสมการต่อไปนี้ % Degumming=$((w_b - w_a) / w_b) \times 100$ (Khan *at al*., 2010) เมื่อ w_b และ w_a คือน้ำหนักของรังไหมแห้งก่อนและหลังสกัดเซริซินออก (ลอกกาวไหม)

ศึกษาสัณฐานวิทยา

ศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นไหมหลังผ่านการสกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6460LV

พิสูจณ์เอกลักษณ์ของผงเซริซินที่ได้จากการลอกกาวไหม

การทำผงเซริซินโดยวิธี Tray dry (Gupta, 2013) พิสูจน์เอกลักษณ์ของผงเซริซินที่เตรียมได้จากการสกัดเปรียบเทียบกับเซริซินมาตรฐานจากบริษัท Sigma-Aldrich ด้วยฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟมิเตอร์ (FTIR) บริษัท PerkinElmer รุ่น Spectrum Two

ศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเซริซิน

การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (Sangwong *et al.* 2016) โดยเตรียมสารละลาย DPPH ในเอทานอลความเข้มข้น 0.02 มิลลิโมลาร์ ผสมกับตัวอย่างสารสกัดในอัตราส่วน 1:1 บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืด 30 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร คำนวณเป็นค่า % Inhibition ของความเข้มข้นต่างๆ และรายงานผลเป็นค่า IC_{50} เทียบกับสารมาตรฐานโทลอกซ์ โดย %Inhibition = $(A_{control} - A_{sample}) \times 100 / A_{control}$

การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS (Fu *et al*., 2017) ผสมสารละลาย 7 มิลลิโมลาร์ ABTS และ 2.45 มิลลิโมลาร์ ของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืด 12-16 ชั่วโมง เจือจางด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 7.4) ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสง 0.7 ± 0.02 ที่ 734 นาโนเมตร ผสมสารละลาย ABTS กับตัวอย่างสารสกัดเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร อัตราส่วน 30:1 บ่มไว้ 15 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารที่ 734 นาโนเมตร แสดงผลเป็นความสามารถต้านทานอนุมูลอิสระเทียบกับโทลอกซ์ต่อสารสกัด 1 กรัม (μmol TE/g DW)

การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP โดยการเตรียม FRAP reagent ซึ่งดัดแปลงมาจาก บัณฑรวรรณ และคณะ (2559) ผสมสารสกัด 300 ไมโครลิตร กับ FRAP reagent 2,700 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 596 นาโนเมตร รายงานความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเทียบกับสารมาตรฐานเฟอร์รัสซัลเฟต (μmol/g DW)

การทดสอบทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่มทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วย Least Square Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (*P*-value < 0.05) โดยใช้โปรแกรม SPSS

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของเวลาต่อการสกัดเซริซิน

ผลของเวลาต่อการสกัดเซริซินโดยใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัด (Figure 1A) พบว่าที่เวลา 20 และ 30 นาทีให้ปริมาณโปรตีนรวมที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกตัวทำละลายละลาย เมื่อพิจารณาเฉพาะการใช้สารสกัดจากใบหม่อนเป็นตัวทำละลายพบว่าได้ปริมาณโปรตีนมากที่สุดเท่ากับ 4.6 ± 0.4 % โดยมวล (Figure 1A (M)) ที่เวลาการสกัดที่ 30 นาที เมื่อเพิ่มเวลาในการสกัดพบว่าได้ปริมาณโปรตีนที่ลดลง เนื่องมาจากโปรตีนได้รับความร้อนเป็นเวลานานจึงเกิดการสลายตัว แต่เมื่อพิจารณาอัตราของการลอกกาวไหมพบว่าเวลาไม่ส่งผลต่ออัตราการลอกกาวไหม (Figure 1B) และให้ผลการทดลองสอดคล้องกับ Niyaz *et al.* (2010) ที่พบว่าเวลาในการสกัดด้วย อัลตราซาวด์ไม่ส่งผลต่ออัตราการลอกกาวไหม

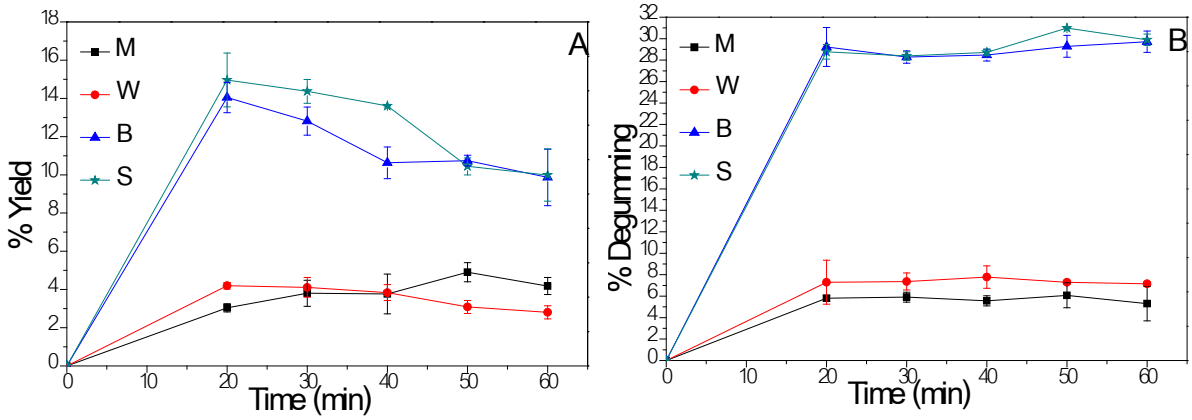


Figure 1 Effect of extraction time on the yield (A) and % degumming of silk (B) extracted with M (—■—), W (—●—), B (—▲—) and S (—★—).

ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดเซริซิน

ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดเซริซินโดยใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัด (Figure 2A) เมื่อสกัดด้วยสารสกัดจากใบหม่อนและน้ำพบว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณโปรตีนที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Figure 2A (M และ W)) แต่เมื่อสกัดด้วยเบสลอกกาวไหมสำเร็จรูปและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณโปรตีนที่ได้ลดลง (Figure 2A (B และ S)) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กนกพร และ

สินีนาฎ (2556) ที่การสกัดเซริซินจากที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีการสลายตัวของโปรตีนสูงกว่าที่ 60 องศาเซลเซียส แต่อัตราการลอกกาวไหมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ (Figure 2B)

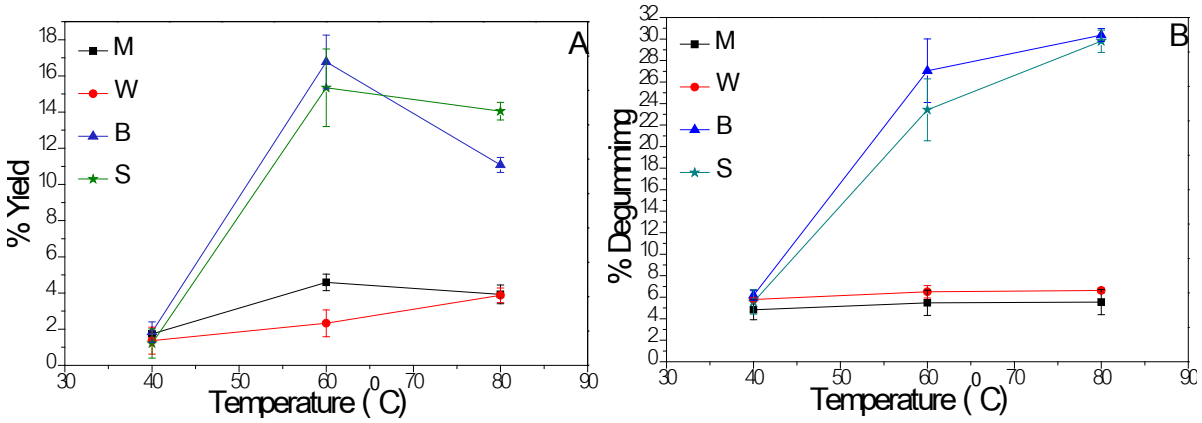


Figure 2 Effect of extraction temperature on the yield (A) and % Degumming of silk (B) extracted with M (▬), W (●), B (▲) and S (★).

ผลของความเข้มข้นของสารสกัดใบหม่อนต่อการสกัดเซริซิน

ผลของความเข้มข้นของสารละลายใบหม่อนในการสกัด (Figure 3) พบว่าสารสกัดใบหม่อนที่ความเข้มข้น 1% โดยมวลต่อปริมาตร ให้ปริมาณโปรตีนมากที่สุด เนื่องมาจากที่ความเข้มข้นของสารสกัดใบหม่อนสูงขึ้น ความอิ่มตัวของสารละลายมากขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายของเซริซินในตัวทำละลายลดลง

ผลของชนิดตัวทำละลายในการสกัดเซริซิน

เมื่อพิจารณาชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดเซริซินพบว่าเบสลอกกาวไหมสำเร็จรูป และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตให้ปริมาณเซริซิน และเปอร์เซ็นต์การลอกกาวไหมสูงกว่าสารสกัดจากใบหม่อนและน้ำอย่างมีนัยสำคัญ (Table 1) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกนกพร และสินีนาฎ (2556) และ Haesung และคณะ (2013) ที่พบว่าการสกัดเซริซินด้วยตัวทำละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบสจะให้ประสิทธิภาพการสกัดเซริซินดีกว่าการสกัดด้วยน้ำร้อน นอกจากนี้ยังให้เส้นไหมที่สะอาดได้เส้นใยเดี่ยวของไฟโบรอินแยกจากกันชัดเจน (Figure 4) แต่เมื่อพิจารณาผงเซริซินที่ได้จากการสกัด พบว่าผงเซริซินที่สกัดจากใบหม่อนและน้ำร้อนมีโครงสร้างใกล้เคียงกับเซริซินมาตรฐาน ซึ่งสังเกตได้จาก FTIR สเปกตรัม (Figure 6) พบว่าพีคที่ 1600-1700 cm^{-1} (เอไมด์ I) และพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของเซริซินคือพีคที่ 1400 cm^{-1} นอกจากนี้ยังมีพีคที่ 1250 cm^{-1} การยืดของ C-N และการงอนอกระนาบของ N-H ในเซริซิน ตามลำดับ (Gupta *et al.*, 2013) ซึ่งพบในตัวอย่างเซริซินจากสารสกัดใบหม่อน น้ำร้อน และเซริซินมาตรฐาน (Figure 6 a-c) และแตกต่างจาก FTIR สเปกตรัมของผงเซริซินจากเบสฟอกกาวไหมสำเร็จรูปและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Figure 6 d-e) ที่มีพีคที่ชัดเจนที่ 1400-1500 และ 890 cm^{-1} ซึ่งเป็นการยืดและการงอของ CO_3 ใน Na_2CO_3 (Figure 6f) (Su *et al.*, 1997) นั่นแสดงให้เห็นว่าการสกัดเซริซินด้วยสารสกัดจากใบหม่อนให้ผงเซริซินที่บริสุทธิ์ ไม่มีการปนเปื้อนของเบสดังที่เกิดขึ้นในผงเซริซินที่ใช้เบสฟอกกาวไหมสำเร็จรูปและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในการสกัด ซึ่งต้องมีกระบวนการทำเซริซินให้บริสุทธิ์ก่อนนำไปไปใช้ประโยชน์

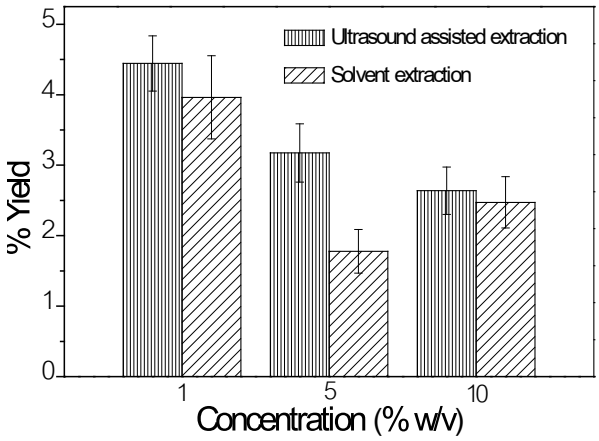


Figure 3 Effect of mulberry leaves extracts concentration on the yield.

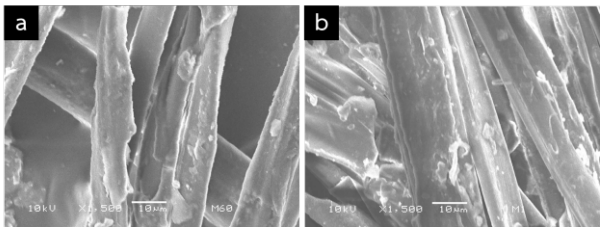


Figure 5 SEM micrographs of UAE (a) and SE (b) using mulberry leaves extracts as a solvent. Original magnification 1,500X.

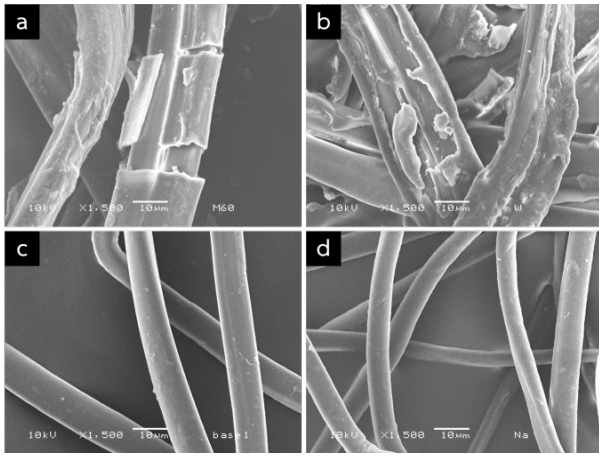


Figure 4 SEM micrographs of silk after extraction with M (a), W (b), B (c) and S (d). Original magnification 3,000X.

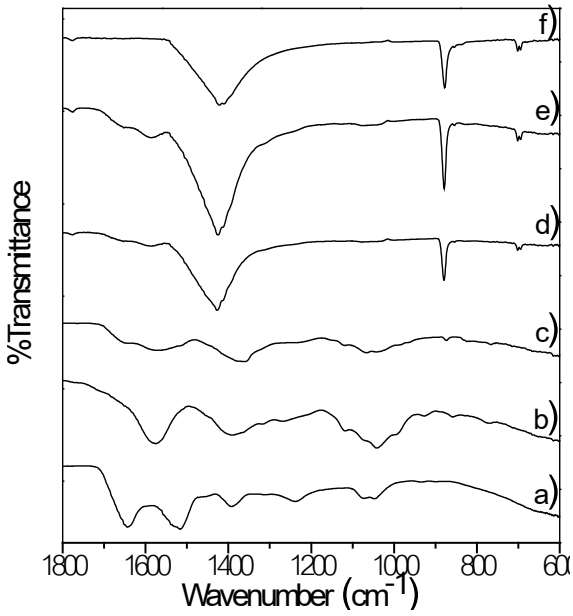


Figure 6 FT-IR spectrum of standard sericin (a), sericin powder extracted with M (b), W (c), B (d), S (e) and sodium carbonate (f)

ผลของอัลตราซาวด์ช่วยในการสกัดเซริซิน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนและเปอร์เซ็นต์การลอกกาวไหมจากการใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัดและการใช้ตัวทำละลายใบหม่อนพบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการสกัดด้วยตัวทำละลายปกติ (Table 1) ซึ่งสอดคล้องกับภาพของเส้นไหมที่ผ่านการสกัดด้วยทั้งสองกระบวนการโดยใช้ตัวทำละลายใบหม่อน (Figure 5) ที่พบว่าเส้นไหมที่ได้มีความคล้ายกันในทั้งสองกระบวนการสกัด โดยพบเซริซินอยู่ที่เส้นไหมและการสกัดเซริซินยังไม่เพียงพอที่จะให้เส้นใยเดี่ยวของไฟโบรอิน

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเซริซิน

เมื่อทดสอบความสามารถในการจับอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH พบว่าผงเซริซินจากสารสกัดใบหม่อนให้ค่า IC_{50} 0.71 ซึ่งให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดอื่น สอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยวิธี ABTS ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 0.38 ± 0.02 (mmol TE/gDW) และความสามารถในการริดิวซ์เฟอร์ริกของผงเซริซินเท่ากับ 32.9 ± 1.4 (μmol $FeSO_4$/gDW) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการต้านอนุมูล

อิสระของเซริซินที่สกัดด้วยสารสกัดจากใบหม่อนโดยใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัดเปรียบเทียบกับการสกัดด้วยตัวทำละลายปกติ พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

Table 1 Effect of ultrasound on sericin yield and % degumming of silk.

Solvent	% Yield		% Degumming	
	UAE	SE	UAE	SE
Mulberry leaves extracts	4.6 ± 0.4^{b}	4.0 ± 0.6^{b}	5.8 ± 1.2^{c}	5.6 ± 0.4^{b}
Hot water	3.9 ± 0.4^{b}	4.0 ± 0.7^{b}	6.5 ± 0.6^{c}	6.4 ± 1.9^{b}
Commercial base for silk degumming	16.8 ± 1.5^{a}	15.3 ± 1.3^{a}	27.1 ± 2.9^{a}*	30.1 ± 0.7^{a}
Sodium carbonate	15.3 ± 2.1^{a}	16.0 ± 2.0^{a}	23.4 ± 2.8^{b}*	31.2 ± 0.4^{a}

Data are represented as the mean S.D. (n = 3); different letters with same column are significantly different and * is significantly different compared with solvent extraction at $P < 0.05$.

Table 2 Antioxidant activity of sericin powder.

solvent	DPPH (IC_{50} : mg/ml)		ABTS (mmol TE/gDW)		FRAP (μmol $FeSO_4$/gDW)	
	UAE	SE	UAE	SE	UAE	SE
M	0.71^{b}	0.68^{b}	0.38 ± 0.01^{a}	0.38 ± 0.02^{a}	32.9 ± 1.4^{a}	32.2 ± 0.1^{a}
W	2.61^{d}*	3.03^{d}	0.18 ± 0.02^{b}	0.22 ± 0.08^{b}	17.5 ± 0.2^{b}*	26.7 ± 3.8^{b}
B	ND.	ND.	0.02 ± 0.01^{c}	0.06 ± 0.02^{c}	2.9 ± 1.1^{d}	2.8 ± 0.1^{d}
S	ND.	ND.	ND.	0.06 ± 0.01^{c}	2.1 ± 0.1^{d}	2.4 ± 0.2^{d}
Standard sericin	1.76^{c}		0.35 ± 0.03^{a}		$10.9. \pm 1.0^{c}$	
Trolox (μg/ml)	13.87^{a}		-		-	

Data are represented as the mean ± S.D. (n = 3); different letters with same column are significantly different and * is significantly different compared with solvent extraction at $P < 0.05$.

สรุป

การสกัดเซริซินจากรังไหมพันธุ์เหลืองไพโรจน์ โดยการใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัดเซริซินจากรังไหมร่วมกับการใช้สารสกัดจากใบหม่อนเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของสารละลายใบหม่อนที่ 1 % w/v ให้ปริมาณเซริซินมากที่สุด เท่ากับ 4.6 ± 0.4 % w/w นอกจากนี้พบว่า FTIR สเปกตรัมของผงเซริซินที่สกัดด้วยสารสกัดจากใบหม่อนให้สเปกตรัมที่ไม่แตกต่างจากเซริซินมาตรฐาน ซึ่งแตกต่างจากสเปกตรัมของผงเซริซินที่สกัดด้วยสารละลายเบส ที่มีโซเดียมคาร์บอเนตปนเปื้อน นอกจากนี้ศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ABTS และ FRAP พบว่าค่า IC_{50} เท่ากับ 0.71 เมื่อศึกษาด้วยวิธี DPPH ให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 0.38 ± 0.02 (mmol TE/gDW) และความสามารถในการริดิวซ์เฟอร์ริกของผงเซริซินเท่ากับ 32.9 ± 1.4 (μmol $FeSO_4$/gDW) เมื่อพิจารณาภาพรวมของประสิทธิภาพของการสกัดเซริซินโดยใช้

อัลตราซาวด์ช่วยในการสกัดพบว่าไม่แตกต่างจากการสกัดด้วยตัวทำละลายปกติ แต่หากมองในแง่ของตัวทำละลายที่ใช้คือสารสกัดจากใบหม่อนมาเป็นตัวทำละลาย นับว่าเป็นทางเลือกที่ดีเนื่องจากให้ให้เซริซินที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าตัวทำละลายชนิดอื่น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ที่สนับสนุนด้าน อุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กนกพร พลเยี่ยม และสินีนาฏ ศิริ. 2556. **การสกัดเซอริซินจากรังไหม** Bombyx mori and Samia cynthia ricini. วารสารสืบเนื่องจากการประชุมหาดใหญ่วิชาการ ครั้งที่ 4: 43-51.

ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. **เครื่องมือวิทยาศาสตร์**, พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น : โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา, 2544.

บัณฑรวรรณ ธุระพระ, จันทนา บุญยะรัตน์, เยาวเรศ ชูลิขิต และสุภาวดี ดาวดี. 2559. **การวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันในส้มโอ**. ว.เภสัชศาสตร์อีสาน. 11: 80-91.

ปัญญดา ปัญญาทิพย์ และคณะ. 2556. **การวิเคราะห์ปริมาณเมลาโทนนินและการศึกษาฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของสารสกัดจากใบหม่อน**.The 5th Annual Northeast Pharmacy Research conference of 2013. 58-59.

เสาวนีย์ กระสานติสุข และหทัยชนก รุณรงค์. 2549. **การพัฒนาตำรับโลชั่นบำรุงผิว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาเภสัชศาสตรบัณฑิต คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

Braford, M. M. 1976. A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing. **Analytical Biochemistry**. 72: 248-254

Fu, M., Xu, Y., Chen, Y., Wu, J., Yu, Y., Zou, B, An, K. and Xiao, G. 2017. Evaluation of bioactive flavonoids and antioxidant activity in Pericarpium Citri Reticulatae (Citrus reticulata 'Chachi') during storage, Food Chem. 230 649–656.

Gupta, D., Agrawal, A., Chaudhary, H., Gulrajani, M. and Gupta, C. 2013. Cleaner process for extraction of sericin using infrared. **Journal of cleaner Production**. 52: 488-494.

Kitisin, T., Maneekan, P. and Luplertlop, N. 2013. In-vitro Characterization of Silk Sericin as an Anti-aging Agent. **Journal of Agricultural Science**. 5: 54-62.

Khan, M. M. R., Tsukada, M., Gotoh, Y., Morikawa, H., Freddi, G. and Shiozaki, H. 2010. Physical properties and dyeability of silk fibers degummed with citric acid. **Bioresource Technology**. 101: 8439-8445.

Haesung, Y., Oh, M., Kim, M. K., Kwak, H. W., Lee, J. Y., Um, I. C., Vootla, S. K. and Lee,K H. 2013. Extraction conditions of Antheraea mylitta sericin with high yields and minimum molecular weight degradation. **International Journal of Biological Macromolecules**. 52: 59-65.

Niyaz, M. M., Mokhtar, A., Firoozmehr, Mazaheri. and Shahram. 2010. Degradation of sericin (degumming) of Persian silk by ultrasound and enzymes as a cleaner and environmentally friendly process, **Journal of Cleaner Production**. 18 : 146-151.

Padamwar, M. N. and Pawar, A. P. 2004. Silk sericin and its applications: A review, **Journal of Scientific & Industrial Research**. 63 : 323-329

Patel, R. J. and Modasiya, M. K. 2011. Sericin : Pharmaceutical Applications, **International Journal of Research in Pharmaceutical and Biomedical Sciences**. 2: 913-917

Sangwong. G., Sumida. M., Sutthikhum. V. 2016. Antioxidant activity of chemically and enzymatically modified sericin extracted from cocoons of Bombyx mori, **Biocatalalysis Agricultural Biotechnology**. 5: 155 – 161.

Su, C. and Suarez, D. L. 1997. In situ infrared speciation of adsorbed carbonate on aluminum and iron oxides. **Clays and Clay Minerals**. 45: 814-825.

การประเมินศักยภาพของราเอนโดไฟต์และราจากดินที่ทนต่อสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนคลอรีน ในการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญของพืช

Evaluation of Plant Growth Promoting Potential of Organochlorine Pesticide Resistant Endophytic and Soil Fungi

จันทร์แรม รูปขำ[1*] ธนภูมิ มณีบุญ[1] และ ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม[1]

Chanram Roopkham[1*], Thanapoom Maneeboon[1] and Siriwan Soiklom[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของเชื้อราเอนโดไฟต์และราจากดินสายพันธุ์ที่ทนต่อสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนคลอรีน ในการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพาะปลูกในพื้นที่ ที่มีการตกค้างของสารฆ่าแมลง ผลการศึกษาพบว่า เชื้อราไอโซเลท P100 สามารถผลิต IAA ได้สูงที่สุดเท่ากับ 58.6 µg/ml แต่ไม่สามารถละลายฟอสเฟตและไม่สร้างซิเดอร์โรฟอร์ นอกจากนี้พบว่ามีเชื้อราจำนวน 4 ไอโซเลท คือ P013 P040 P041 และ P054 ที่สามารถละลายฟอสเฟต สร้างซิเดอร์โรฟอร์ และผลิตฮอร์โมน IAA (6.10, 1.63, 1.73 และ 4.42 µg/ml ตามลำดับ) ผลการจำแนกชนิดของเชื้อราโดยเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์แสดงให้เห็นว่าเชื้อราไอโซเลท P100 P013 และ P040 มีความคล้ายคลึงกับเชื้อรา *Fusarium proliferatum*, *Aspergillus japonicas* และ *A. niger* ตามลำดับ สำหรับเชื้อราไอโซเลท P041และ P054 พบว่ามีความคล้ายคลึงกับ *A. fijensis*

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate of plant growth promoting potential of organochlorine pesticide resistant endophytic and soil fungi for application in agricultural crop field especially in pesticide contaminated soil. Results showed that fungal isolate P100 produced the highest IAA up to 58.6 µg/ml but unable to solubilize phosphate and also did not produce siderophore. In addition, 4 isolates namely, P013 P040 P041 and P054, were found to solubilize phosphate and to produce both siderophore and IAA (6.10, 1.63, 1.73 and 4.42 µg/ml, respectively). Result of nucleotide sequence analysis showed that fungal isolate P100 P013 and P040 were closely related to *Fusarium proliferatum*, *Aspergillus japonicas* and *A. niger*, respectively. For isolate P041 and P054, they were identified *A. fijensis*.

Key words: plant growth promoting fungi, IAA, phosphate solubilization, siderophore production

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

[1]ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาพัฒนาแห่ง มก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Scientific Equipment and Research Division, KURDI, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปัจจุบันมีการใช้สารฆ่าแมลง ปุ๋ยเคมี และสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในการเกษตรกันอย่างแพร่หลาย ทำให้เกิดการสะสมอยู่ในสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะดินในแปลงเพาะปลูก การใช้จุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Plant growth promoting microorganism หรือ PGPM) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อทดแทนการใช้สารเคมีในการเกษตร เนื่องจากมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กลไกของจุลินทรีย์ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ การตรึงไนโตรเจน การละลายสารอาหารในดิน เช่น การละลายฟอสเฟต การสร้างซิเดอร์โรฟอร์ การผลิตฮอร์โมนพืช เช่น ฮอร์โมนกลุ่มออกซิน ไซโตไคนิน และ จิบเบอเรลลิน รวมทั้งการควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์สาเหตุโรคพืช (Vessey, 2003) จุลินทรีย์ที่มีรายงานว่าเป็นเชื้อที่มีคุณสมบัติส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชมีทั้งจุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรีย แอคติโนมัยสีท และเชื้อรา เช่น *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azotobacter, Streptomyces, Aspergillus*, *Penicillium* และ *Trichoderma* (Gupta and Samnotra, 2004 และ Verma *et al*., 2010) แต่เนื่องจากปัญหาการปนเปื้อนสารเคมีทางการเกษตรในดินที่ใช้เพาะปลูกโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารฆ่าแมลงในกลุ่มออร์แกโนคลอรีน ซึ่งแม้ว่าในปัจจุบันจะถูกระงับการใช้ในหลายประเทศทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทย ทำให้ยังคงพบการตกค้างของสารฆ่าแมลงในกลุ่มนี้ (Keithmaleesatti *et al*., 2009) เป็นสาเหตุให้การนำเชื้อจุลินทรีย์ไปใช้เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในบริเวณดังกล่าวไม่เกิดประสิทธิภาพเท่าที่ควร เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถทนต่อสารฆ่าแมลงที่ตกค้างในบริเวณนั้นได้

การวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเชื้อราเอนโดไฟต์และราจากดินที่ทนต่อสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนคลอรีน ซึ่งคัดแยกโดย ธนภูมิ และคณะ (2559) ในการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เพื่อคัดเลือกเชื้อราที่สามารถเจริญในสภาวะที่มีสารฆ่าแมลงและกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช โดยศึกษาคุณสมบัติการละลายฟอสเฟต การสร้างซิเดอร์โรฟอร์ และการผลิตฮอร์โมนพืช

อุปกรณ์และวิธีการ

เชื้อรา

เชื้อราที่ใช้ในการทดสอบเป็นเชื้อราที่ทนต่อสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนคลอรีน จำนวน 50 ไอโซเลท แบ่งเป็นเชื้อราเอนโดไฟต์จำนวน 35 ไอโซเลท และราจากดินจำนวน 15 ไอโซเลท ซึ่งแยกโดย ธนภูมิและคณะ (2559)

การจำแนกราเอนโดไฟต์ที่ทนต่อสารฆ่าแมลงโดยใช้วิธีทางอณูชีววิทยา

นำเชื้อรามาเลี้ยงบนอาหาร PDA เมื่อเชื้อราเจริญแล้วนำมาสกัดดีเอ็นเอเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอด้วยเทคนิค Polymerase chain reaction (PCR) โดยใช้ไพรเมอร์ที่จำเพาะกับบริเวณ internal transcribed spacer (ITS) โดยใช้ไพรเมอร์ ITSI และ ITS4 ในการทำ PCR แล้วส่งวิเคราะห์หาลำดับนิวคลีโอไทด์ (Sequencing) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ลำดับเบสอัตโนมัติ (ABI 3730XL) ชนิดที่เป็นการอ่านลำดับเบสทั่วไป กับบริษัท Aitbiotech Pte. Ltd.

(Singapore) อ่านลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยโปรแกรม MEGA version 6 (Tamura *et al*., 2013) แล้วเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ในฐานข้อมูลของ National Center of Biotechnology (NCBI) โดยใช้โปรแกรม BLAST (Johnson *et al*., 2008)

ทดสอบการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญของพืช

ทดสอบการละลายฟอสเฟต

ทดสอบการละลายฟอสเฟตตามวิธีของ Husen (2003) โดยการเลี้ยงราบนอาหารแข็ง Pikovskaya's agar บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 วัน และตรวจสอบลักษณะบริเวณใส (clear zones) ที่เกิดจากการละลายฟอสเฟต

การสร้างซิเดอร์โรฟอร์

เลี้ยงเชื้อราบนอาหารแข็ง Chrome azurol S agar (CAS) บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วัน ตามวิธีของ Schwyn and Neilands (1987) ตรวจสอบสีเหลืองถึงส้ม (yellow to orange colour) ที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงถึงผลบวกจากการสร้างซิเดอร์โรฟอร์

การวิเคราะห์หาปริมาณ IAA ด้วยวิธีทางเคมี

เลี้ยงเชื้อราในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวชนิด Czapex Dox Broth (CDB) ปริมาตร 50 ml ที่มีการเติม L-tryptophan 1g/L นำมาบ่มที่อุณหภูมิห้องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำมาหาปริมาณ IAA ด้วยวิธี Colouric method (Gordon and Weber, 1951) ทำปฏิกิริยากับสารละลาย Salkowski reagent ตรวจสอบสีชมพูที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการสร้าง IAA จากการวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร โดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

เมื่อจำแนกชนิดของราเอนโดไฟต์และราจากดินที่ทนต่อสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนคลอรีนโดยการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนบริเวณ ITS พบว่าจากเชื้อราจำนวน 50 ไอโซเลท ส่วนใหญ่เป็นเชื้อราในจีนัส *Aspergillus* (21 ไอโซเลท) รองลงมาคือจีนัส *Trichoderma* (19 ไอโซเลท) *Fusarium* (6 ไอโซเลท) *Penicillium* (2 ไอโซเลท) *Alternaria* และ *Hamigera* (1 ไอโซเลท) ตามลำดับ เมื่อทดสอบการละลายฟอสเฟตพบว่ามีเชื้อราจำนวน 4 ไอโซเลท สามารถละลายฟอสเฟตได้ ได้แก่ P013, P040, P041 และ P054 (Figure 1) สำหรับผลการทดสอบการสร้าง ซิเดอร์โรฟอร์ พบว่ามีชื้อราจำนวน 11 ไอโซเลท สามารถสร้างซิเดอร์โรฟอร์โดยปรากฏสีเหลืองอมส้มที่บริเวณรอบโคโลนีของเชื้อรา (Figure 2) และเมื่อทำการเพาะเลี้ยงเชื้อราในอาหาร Czapex Dox Broth ที่เติม L-tryptophan 1g/L และนำอาหารเลี้ยงเชื้อไปวิเคราะห์ปริมาณ IAA พบว่ามีเชื้อราจำนวน 48 ไอโซเลท สร้างฮอร์โมน IAA โดยเชื้อรา P100 มีการผลิตฮอร์โมน IAA สูงที่สุดได้เท่ากับ 58.6 µg/ml รองลงมาคือ เชื้อรา P013 ที่ผลิต IAA ได้เท่ากับ 6.10 µg/ml (Table 1)

จากผลการทดสอบความสามารถในการเป็นเชื้อราส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช พบว่าเชื้อราจำนวน 4 ไอโซเลท ที่สามารถละลายฟอสเฟต สร้างซิเดอร์โรฟอร์และผลิต IAA ได้แก่ *A. japonicus* P013, *A. niger* P040, *A. fijiensis* P041 และ *A.fijiensis* P054 ในขณะที่ *F. proliferatum* P100 ที่พบว่าผลิตฮอร์โมน IAA ในปริมาณที่สูงกว่าเชื้อทดสอบอื่นๆ ถึง 10 เท่า แต่ไม่สามารถละลายฟอสเฟตและสร้างซิเดอร์โรฟอร์ได้

ผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่าเชื้อราที่เป็นเชื้อราส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในกลุ่ม *Aspergillus* จะสามารถผลิตกรดอินทรีย์ออกมาเพื่อละลายฟอสเฟต นอกจากนี้เชื้อราในกลุ่ม *Aspergillus* และ *Penicillium* ยังมีรายงานว่าสามารถผลิตเอนไซม์ฟอสฟาเตสเพื่อย่อยหินฟอสเฟตเพื่อใช้เป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์กับพืช (Elias *et al*., 2016)

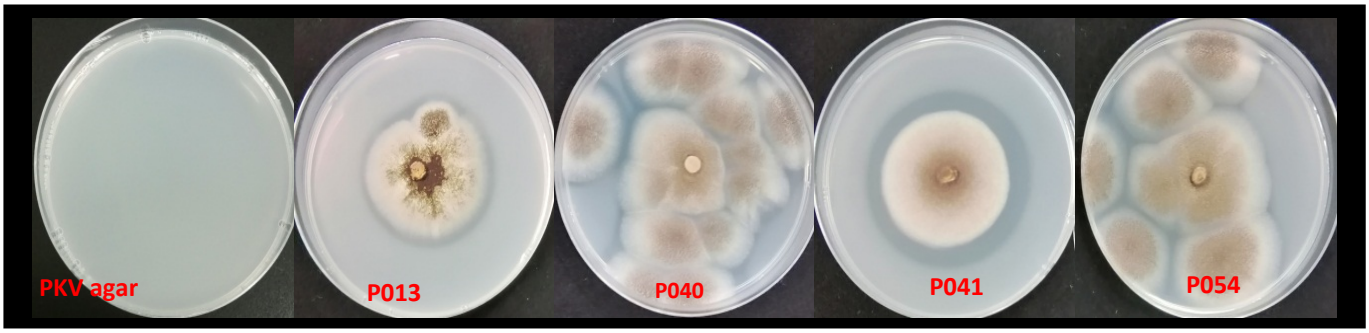


Figure 1 Phosphate solubilization by endophytic and soil fungi

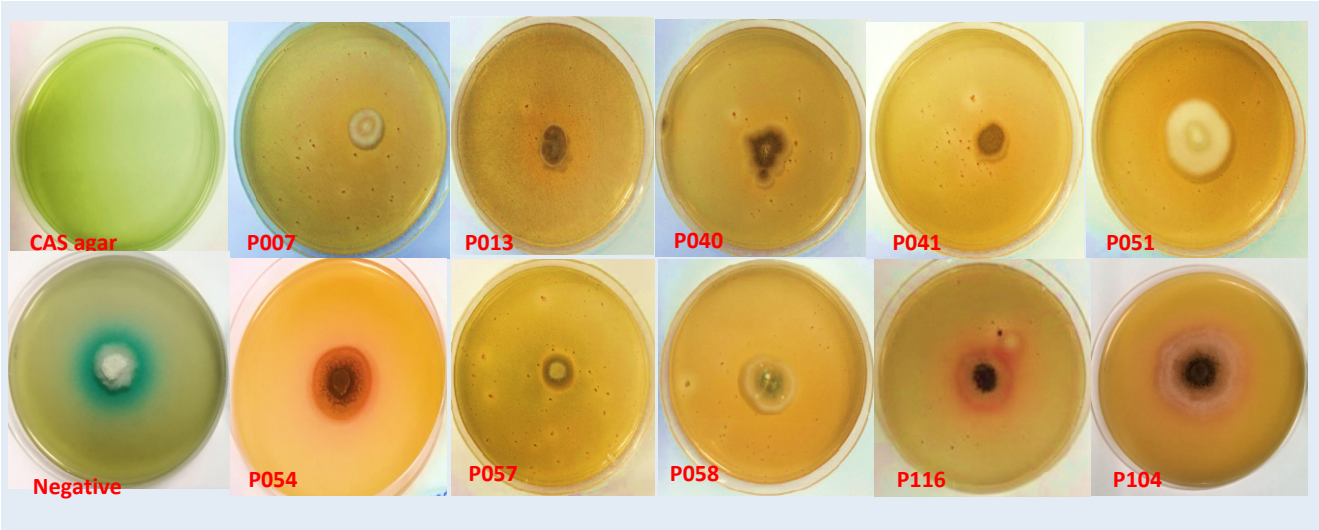


Figure 2 Siderophore production by endophytic and soil fungi

Table 1 Phosphate solubilization, siderophore production and IAA production of organochlorine pesticide resistant fungi

Isolate	*Molecular Identification*	Accession number	Phosphate solubilization	Siderophore production	IAA production (µg/ml)
P007	*Trichoderma harzianum*	KY378955	-	+	1.75

P008	*Trichoderma longibrachiatum*	KY346983	-	-	1.55
P009	*Trichoderma* sp.	KY425725	-	-	1.55
P011	*Aspergillus oryzae*	KX522630	-	-	2.38
P013	*Aspergillus japonicus*	KC128815	+	+	6.10
P017	*Trichoderma harzianum*	KT852806	-	-	-
P021	*Trichoderma harzianum*	KT852833	-	-	1.51
P022	*Trichoderma reesei strain*	KU377472	-	-	2.99
P023	*Trichoderma harzianum*	KT192387	-	-	1.48
P027	*Trichoderma harzianum*	KT192387	-	-	1.48
P028	*Aspergillus* sp.	KX008667	-	-	1.35
P029	*Trichoderma harzianum*	KT852833	-	-	1.36
P032	*Trichoderma harzianum*	KY425735	-	-	1.29
P034	*Trichoderma longibrachiatum*	KX463453	-	-	1.39
P036	*Trichoderma harzianum strain*	KT192387	-	-	1.43
P039	*Aspergillus niger*	KT726919.	-	-	4.41
P040	*Aspergillus niger*	KT726919	+	+	1.63
P041	*Aspergillus fijiensis*	KU729079	+	+	1.73
P050	*Aspergillus flavus*	KX067887	-	-	2.03
P051	*Penicillium citrinum*	LC105674	-	+	1.65
P054	*Aspergillus fijiensis*	KU729079	+	+	4.42
P057	*Trichoderma harzianum*	KR856216	-	+	2.64
P058	*Trichoderma harzianum*	KC847194	-	-	1.84
P060	*Trichoderma* sp.	KY363353	-	-	1.28
P061	*Trichoderma harzianum*	KR856216	-	-	1.28

Table 1 (cont.)

Isolate	*Molecular Identification*	Accession number	Phosphate solubilization	Siderophore production	IAA production (µg/ml)
P063	*Trichoderma harzianum*	KX421473	-	-	1.23
P064	*Trichoderma harzianum*	KC874893	-	-	1.11
P065	*Trichoderma* sp.	KY363353	-	-	1.31
P067	*Penicillium* sp.	KX611014	-	-	1.39

P073	*Fusarium solani*	KY617035	-	-	2.14
P076	*Aspergillus flavus*	KX067887	-	-	1.75
P077	*Aspergillus flavus*	KX067887	-	-	1.93
P078	*Aspergillus flavus*	KX067887	-	-	1.41
P081	*Aspergillus flavus*	KX067887	-	-	1.49
P083	*Aspergillus* sp.	KX009135	-	-	2.57
P090	*Fusarium solani*	KX583245	-	+	2.74
P091	*Fusarium solani*	KX583245	-	+	2.51
P092	*Alternaria alternata*	KY684263	-	-	-
P094	*Hamigera fusca*	NR_137734	-	-	3.47
P097	*Fusarium solani*	KX583245	-	-	1.32
P100	*Fusarium proliferatum*	KT581408	-	-	58.6
P102	*Aspergillus flavus*	DQ467978	-	-	2.19
P103	*Aspergillus flavus*	EF409807	-	-	1.46
P104	*Aspergillus niger*	KY318505	-	+	1.15
P105	*Aspergillus flavus*	EF409807	-	-	1.38
P106	*Aspergillus* sp.	KX009135	-	-	1.94
P114	*Fusarium solani*	KT211526	-	-	1.58
P116	*Talaromyces pinophilus*	KM458832	-	-	1.99
P117	*Talaromyces pinophilus*	KM458832	-	+	1.50
P118	*Talaromyces pinophilus*	KM458832	-	-	1.98

\+ means positive result

\- means negative result

สรุป

การวิจัยนี้สามารถคัดเลือกเชื้อราเอนโดไฟต์และราจากดินสายพันธุ์ที่ทนต่อสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนคลอรีนที่มีศักยภาพในการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญของพืช โดยพบเชื้อรา *F. proliferatum* P100 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ผลิตฮอร์โมน IAA ได้ในปริมาณสูง ซึ่งมีโอกาสใช้ในการผลิตฮอร์โมน IAA ในทางการค้าได้ รวมทั้งได้เชื้อราที่มีคุณสมบัติครอบคลุมทั้งการละลายฟอสเฟต การสร้างซิเดอร์โรฟอร์ รวมทั้งสามารถผลิตฮอร์โมน IAA ได้แก่ P013 P040 P041 และ P054 ซึ่งล้วนเป็นเชื้อราในจีนัส *Aspergillus* สำหรับใช้เพื่อส่งเสริมการเจริญของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพาะปลูกในพื้นที่มีการปนเปื้อนของสารฆ่าแมลง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ธนภูมิ มณีบุญ, ชนัญญา ช่วยศรีนวล, กฤตยา เพชรผึ้ง, รุ่งนภา ก่อประดิษฐ์สกุล, ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม และจันทร์แรม รูปขำ. 2559. การย่อยสลายสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนคลอรีนบางชนิดที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมโดยเชื้อราจากดิน : การคัดแยกและการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปี 2558. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Elias, F., D. Woyessa and D. Muleta. 2016. Phosphate solubilization potential of rhizosphere fungi isolated from plants in Jimma zone, Southwest Ethiopia. **Int J Microbiol.** vol. 2016, Article ID 5472601, 11 pages, 2016. doi:10.1155/2016/5472601

Gordon, S. A. and R. P. Weber. 1951. Colorimetric estimation of indoleacetic acid. **Plant Physiol.** 26:192-195

Gupta, A. K. and R. K. Samnotra. 2004. Effects of biofertilizers and nitrogen on growth, quality and yield of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) cv. Golden acre. **Envir. Ecol.** 22(3): 551–553.

Husen, E. 2003. Sceening of soil bacteria for plant growth promotion activities in vitro. **Indonesian J. Agric. Sci.** 4 (1): 27-31.

Johnson, M., I. Zaretskaya, Y. Raytselis, Y. Merezhuk, S. McGinnis, and T. L. Madden. 2008. NCBI BLAST: a better web interface. **Nucleic Acids Research.** *36*(Web Server issue), W5–W9. http://doi.org/10.1093/nar/gkn201

Keithmaleesatti, S., P. Varanusupakul, W. Siriwong, K. Thirakhupt, M. Robson and N. Kitana. 2009. Contamination of organochlorine pesticides in nest soil, egg, and blood of the snail-eating turtle (*Malayemys macrocephala*) from the Chao Phraya River Basin, Thailand. **World Acad. Sci. Eng. Technol.** 52: 444-449.

Schwyn, B. and J.B. Neilands. 1987. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. **Anal. Biochem.** 160: 47–56

Tamura, K., G. Stecher, D. Peterson, A. Filipski and S. Kumar. 2013. MEGA6: Molecular evolutionary genetics analysis version 6.0. **Molecular Biology and Evolution.** 30(12): 2725-2729.

Verma, J. P., J. Yadav, K. N. Tiwari and V. L. Singh. 2010. Impact of plant growth promoting rhizobacteria on crop production. **Int. J. Agri. Res.** 5(11):954–983

Vessey, J. K. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. **Plant and Soil.** 255(2): 571–586

การคัดแยกแอคติโนมัยซีทที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากบ่อน้ำพุร้อนทุ่งนุ้ย จังหวัดสตูล

Isolation of Cellulase Producing Actinomycetes from Thung Nui Hot Spring, Satun Province

สายใจ วัฒนเสน[1*] สุโรจนา ยานา[1] และ พาซีล๊ะ ฮามะ[1]

Saijai Wattanasen[1*], Surojjana Yana[1] and Paseelah Hama [1]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกแบคทีเรียแอคติโนมัยซีทที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากบ่อน้ำพุร้อนทุ่งนุ้ย จังหวัดสตูล โดยทำการเก็บตัวอย่างดินตะกอน จำนวน 20 ตัวอย่าง นำมาคัดแยกเชื้อโดยวิธี spread plate method บนอาหาร starch caseinate agar สามารถคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีทได้ทั้งหมด 17 ไอโซเลท เมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส บนอาหาร carboxy methyl cellulose (CMC) agar พบว่ามี 14 ไอโซเลทที่สามารถย่อยสลาย carboxy methyl cellulose ในอาหาร CMC agar โดยให้ค่า hydrolysis capacity (HC value) อยู่ระหว่าง 1.35-12.35 แอคติโนมัยซีทไอโซเลท Cr10 Cr11 และCr1 ให้ค่า HC สูงสุดเท่ากับ 12.35 11.42 และ 11.30 ตามลำดับ จากการนำแอคติโนมัยซีททั้ง 3 ไอโซเลทมาศึกษาการสร้างเอนไซม์เซลลูเลสในอาหารเหลวและคำนวณค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส พบว่าไอโซเลท Cr 1 ให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด เท่ากับ 3.35 unit/ml ในขณะที่ ไอโซเลท Cr11 และ Cr10 ให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสเท่ากับ 3.22 และ2.73 unit/ml ตามลำดับ จากผลการศึกษาสามารถนำเชื้อแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้ไปศึกษาต่อเพื่อประยุกต์ใช้เป็นหัวเชื้อในการย่อยสลายวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่อไป

ABSTRACT

The aim of this study is to isolate the actinomycetes bacteria that can produce cellulase enzyme from Thung Nui Hot Spring, Satun province. The 20 soil sediment samples were collected and then were isolated for actinomycetes by spread plate method on starch caseinate agar. Total of 17 actinomycetes isolates were found and the production of cellulase was determined on carboxy methyl cellulose (CMC) agar. It was found that 14 isolates degraded carboxy methyl cellulose on CMC agar with the hydrolysis capacity (HC value) of 1.35 to 12.35. The highest HC value was found in isolates Cr10, Cr11 and Cr1 with the HC value of 12.35, 11.42 and 11.30, respectively. After that, the three isolates were selected for study of cellulase production in broth medium and cellulase activity was evaluate. The results showed that the isolate Cr1 has the highest cellulase activity of 3.35 unit/ml, while, the isolates Cr11 and Cr10 have the cellulase activity of 3.22 and 2.73 unit/ml, respectively. From this study, the selected actinomycetes can be used for further study in an application of agricultural wastes degradation.

Key Words: actinomycetes, cellulase, hot spring

* Corresponding author; e-mail address: **saijai99@yahoo.com**

[1]โปรแกรมวิชาวิชาชีววิทยาและชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา สงขลา 90000

[1]Program of Biology and Applied Biology, Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, 90000

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีเศษวัสดุอินทรีย์ที่เหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมากทั้ง ใบไม้ เศษไม้ และเศษวัชพืชต่างๆ โดยที่เศษวัสดุเหล่านี้มีส่วนประกอบของเซลลูโลสซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช และการนำเอาเศษของเหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปเพื่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม เช่น การนำไปทำปุ๋ยหมักหรือสารตั้งต้นในการผลิตพลังงานทดแทนจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่นำมาใช้เพื่อลดปัญหามลภาวะในสิ่งแวดล้อม การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือน้ำตาลกลูโคสยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์ โปรตีนเซลล์เดียว วิตามิน กรดอินทรีย์ หรือเคมีภัณฑ์อื่น ๆ ผ่านกระบวนการหมัก นอกจากนี้ยังสามารถนำเอนไซม์เซลลูเลสไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นการผลิตยาง อาหารและกระดาษ เป็นต้น ในธรรมชาติมีสิ่งมีชีวิตหลายชนิดที่สามารถสร้างเอนไซม์เซลลูเลสเพื่อย่อยสลายเซลลูโลส เช่นสัตว์ทะเลในกลุ่มเพรียงหัวหอม (Tunicate) หอยทากยักษ์ (Achatinafulica) รวมทั้งจุลินทรีย์หลายชนิดทั้งแบคทีเรีย แอคติโนมัยซีท และเชื้อรา ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะสร้างเอนไซม์เซลลูเลสที่มีความสามารถในการย่อยสลายแตกต่างกันขึ้นกับสภาวะแวดล้อมที่จุลินทรีย์เหล่านั้นเจริญอยู่ เอนไซม์เซลลูเลสจากจุลินทรีย์เป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสให้ได้ผลผลิตเป็นน้ำตาลกลูโคสและยังนำมาใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ ด้านทั้งในด้านลดมลภาวะในสิ่งแวดล้อม เช่น บำบัดน้ำเสีย และขยะต่าง ๆ (ทิพวรรณ, 2553)

แอคติโนมัยซีท เป็นแบคทีเรียกลุ่มหนึ่งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับเชื้อรา โคโลนีขนาดค่อนข้างใหญ่ มีการเจริญเป็นเส้นใย สร้างสปอร์แบบไม่อาศัยเพศ ขนาดของเซลล์เล็กใกล้เคียงกับแบคทีเรีย ส่วนของเส้นใยที่สัมผัสกับอากาศแห้งจะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นสปอร์ ใช้ในการแพร่พันธุ์ได้เช่นเดียวกันกับเชื้อรา เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่มีความสำคัญในระบบนิเวศ เป็นผู้ย่อยสลายทำให้เกิดความสมดุลในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้แอคติโนมัยซีทยังเป็นเชื้อที่มีความสำคัญทางการแพทย์ และเภสัชกรรม เนื่องจากสามารถผลิตสารเมแทบอไลต์ได้หลายชนิดและยังสามารถผลิตสารที่เป็นปฏิปักษ์กับเชื้อสาเหตุโรคพืช ตลอดจนผลิตสารที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้อีกด้วย สามารถพบแอคติโนมัยซีทได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ในดิน น้ำ อากาศ อาหารและในพืช แหล่งที่พบมากได้แก่บริเวณที่มีการสะสมของสารอินทรีย์ เช่น ดินเพาะปลูก วัตถุเน่าเปื่อย โคลน ตะกอนในแม่น้ำ ใต้ทะเล ป่าชายเลน หรือ ดินบริเวณน้ำพุร้อน โดยเฉพาะบริเวณน้ำพุร้อนที่มีสภาพแวดล้อมต่างจากดินทั่ว ๆ ไป จึงเป็นแหล่งที่น่าจะพบความหลากหลายของแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ และยังเป็นที่น่าสนใจของนักวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถคัดเลือกสายพันธุ์ที่ทนร้อนนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพได้มากมาย ในต่างประเทศมีการศึกษาแบคทีเรียทนร้อนอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในน้ำพุร้อน (Abdelnasser *et al*., 2007; Adiguzel *et al*., 2016; Chaudhary and Prabhu, 2016) ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะศึกษาความหลากหลายของแอคติโนมัยซีทในดินตะกอนบริเวณน้ำพุร้อนต่าง ๆ ซึ่งอาจจะได้สายพันธุ์ของเชื้อที่หลากหลายนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกแอคติโนมัยซีทที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากบ่อน้ำพุร้อนทุ่งนุ้ย จังหวัดสตูล เพื่อเป็นข้อมูลในด้านความหลากหลายของเชื้อแอคติโนมัยซีทจากแหล่งน้ำพุร้อน และอาจได้สายพันธุ์ของเชื้อที่มีศักยภาพในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้สูงนำไปศึกษาต่อเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตรต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การคัดแยกแอคติโนมัยซีทจากตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินตะกอนบริเวณที่มีการสะสมของตะกอนและเศษซากอินทรีย์ต่าง ๆ จำนวน 20 ตัวอย่าง นำมาคัดแยกแบคทีเรียแอคติโนมัยซีท โดย ชั่งตัวอย่างดินปริมาณ 10 กรัมใส่ลงใน 0.85% NaCl ปริมาตร 90 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันจะได้ความเจือจางเป็น 10^{-1} จากนั้นทำการเจือจางต่อจนได้ความเจือจางตั้งแต่ 10^{-1} ถึง 10^{-5} จากนั้น ปิเปตตัวอย่างที่ความเจือจาง 10^{-3} 10^{-4} และ 10^{-5} ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงบนอาหาร starch caseinate agar ที่มีส่วนผสมของยาปฏิชีวนะไซโคลเฮกซิไมด์ (50 μg/ml) และ นีสเตติน (50 μg/ml) ทำการเกลี่ยให้ทั่วผิวหน้าอาหารนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5-7 วัน สังเกตโคโลนีของเชื้อที่มีลักษณะเป็นเส้นใยอัดแน่น หรือฟู มีลักษณะคล้ายผงหรือฝุ่นแป้ง หยาบกระด้าง แข็ง คล้ายขนสัตว์หรือผ้ากำมะหยี่ อาจมีการสร้างรงควัตถุสีต่างๆ จากการสร้างสปอร์ เช่น สีขาว สีครีม หรือสีเทา คัดเลือกโคโลนีที่มีลักษณะดังกล่าวนำไปทำให้เป็นเชื้อบริสุทธิ์เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในศึกษาต่อไป

ศึกษาความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสของแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้โดยวิธี Agar spot

นำเชื้อแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้มาเลี้ยงในอาหาร starch caseinate agar เป็นเวลา 5-7 วัน จากนั้นใช้ไม้จิ้มฟันปราศจากเชื้อ เขี่ยโคโลนีของเชื้อนำไป spot บนผิวหน้าอาหาร CMC agar บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน วัดขนาดของวงใสรอบๆ โคโลนีของเชื้อโดยการย้อมด้วย 0.1% congo red เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงเทสารละลายออก และเททับด้วย sodium chloride ความเข้มข้น 1 N จนท่วมทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที เทสารละลายออก วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการเกิดบริเวณใส (clear zone) ประเมินระดับการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากค่า hydrolysis capacity (HC value) โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างรัศมีของโซนใสและโคโลนีของเชื้อบนอาหาร (Hendricks *et al*., 1995) จากนั้นคัดเลือกเชื้อแอคติโนมัยซีทที่มีค่า HC สูงสุด 3 ไอโซเลต เพื่อนำไปศึกษาสร้างเอนไซม์เซลลูเลสในอาหารเหลวและหากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสต่อไป

ศึกษาการสร้างเอนไซม์เซลลูเลสในอาหารเหลวและการหากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส

นำเชื้อแอคติโนมัยซีทที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด 3 ไอโซเลต มาหาค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส โดยทำการเพาะเลี้ยงแอคติโนมัยซีทที่คัดเลือกได้ให้เป็นเชื้อบริสุทธิ์บนอาหาร CMC agar เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง จากนั้นคัดเลือกโคโลนีของเชื้อ 2-3 โคโลนี นำมาเลี้ยงในอาหารเหลวปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วย carboxy methyl cellulose 0.1 กรัม polypeptone 0.5 กรัม yeast extract 0.1 กรัม K_2HPO_4 0.4 กรัม KCl 0.02 กรัม $MgSO_4.7H_2O$ 0.1 กรัม และ $FeSO_4.7H_2O$ 0.002 กรัม pH 7 นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นนำไปวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส โดยนำเซลล์ที่เจริญในอาหารเหลวไปหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที นำส่วนใสที่ได้ไปหากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสด้วยวิธี dinitrosalicylic acid (DNS) reagent (Miller, 1959) โดยนำสารละลายเอนไซม์ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร เติมในลงใน สารละลาย 0.05 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่มีส่วนผสมของ 1% CMC ปริมาตร 1.8 มิลลิลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หยุดปฏิกิริยาโดยการเติมสารละลาย DNS ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันนำไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 10 นาที ทำให้เย็นทันทีโดยแช่ในน้ำแข็ง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร คำนวณหากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสโดยเทียบเคียงจากกราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส โดย 1 หน่วยเอนไซม์คือปริมาณเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายสารตั้งต้นได้เป็นกลูโคส 1 ไมโครโมล ภายในเวลา 1 นาที ภายใต้สภาวะมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีทจากตัวอย่างดิน

จากตัวอย่างดินตะกอนทั้งหมด 20 ตัวอย่างนำมาคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีทโดยวิธี spread plate บนอาหาร starch caseinate agar พบว่าสามารถคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีทที่มีลักษณะโคโลนีแตกต่างกันได้ทั้งหมด 17 ไอโซเลท โดยลักษณะทั่วไปของโคโลนีที่ขึ้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อมีลักษณะแตกต่างกันบางโคโลนีมีสีขาวขุ่นคล้ายแป้ง กลางโคโลนีนูน หรือมีลักษณะฟูเล็กน้อย บางโคโลนีมีสีเทานูนกลางโคโลนีจะมีสีขาว สีน้ำตาลจนถึงสีเทา ขอบโคโลนีเรียบ (Figure 1 and Figure 2) โดยจำนวนแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้มีจำนวนมากกว่ารายงานของ จามจุรี และคณะ (2555) ที่คัดแยกแอคติโนมัยซีทจากมูลสัตว์โดยใช้อาหาร CMC agar และกระดาษกรอง แยกแอคติโนมัยซีทที่มีลักษณะโคโลนีแตกต่างกันได้เพียง 6 ไอโซเลท แต่เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้จากรายงานของ Chitti Thawai (2012) ซึ่งคัดแยกแอคติโนมัยซีทที่สร้างสารปฏิชีวนะจากตัวอย่างดินตะกอนจากน้ำพุร้อนในจังหวัดกระบี่โดยวิธีการนำตัวอย่างดินตะกอนมาทำให้แห้งด้วยวิธี air dried ก่อนนำมาคัดแยกโดยใช้อาหาร humic acid salt vitamin agar ที่ผสมกับยาปฏิชีวนะ พบว่าสามารถคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีทได้จำนวน 32 สายพันธุ์ ซึ่งมากกว่าการใช้อาหาร starch caseinate agar ในการศึกษาครั้งนี้ นอกจากนี้จากการคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีทจากตัวอย่างดินรอบรากพืชจากแปลงเกษตรกรในเขตจังหวัดอุบลราชธานี และจังหวัดศรีสะเกษ โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ enrichment media for isolation of chitinase-producing actinomycetes (EMCA agar) ของปราณี และชนิดาภา (2555) ก็พบว่าสามารถคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีทได้เป็นจำนวนมากถึง 283 ไอโซเลท ดังนั้นการคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีทนอกจากจะขึ้นอยู่กับตัวอย่างที่จะใช้ในการคัดแยกแล้ว วิธีการคัดแยกที่เหมาะสม การเตรียมตัวอย่างสำหรับการคัดแยกและอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในการคัดแยกจึงมีความสำคัญและมีผลต่อจำนวนของเชื้อแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้

Figure 1 Colonies of actinomycetes on starch caseinate agar

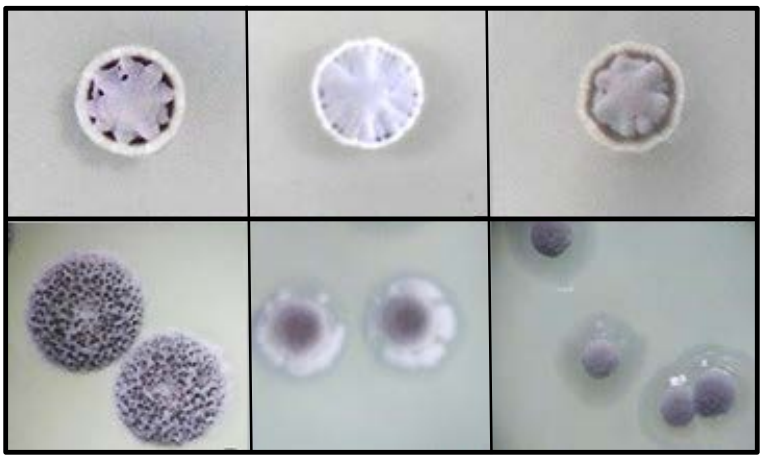


Figure 2 Single colonies of actinomycetes on starch caseinate agar

ผลการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสเบื้องต้นของเชื้อแอคติโนมัยซีท

จากเชื้อแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้ทั้งหมด 17 ไอโซเลท เมื่อนำมาศึกษาความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสเบื้องต้น พบว่ามี 14 ไอโซเลทที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสย่อยสลาย carboxy methyl cellulose ในอาหาร CMC agar สังเกตได้จากลักษณะของโซนใสรอบ ๆ โคโลนีของเชื้อบนอาหาร CMC agar (Figure 3) จากการประเมินระดับการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากค่า HC โดยการคำนวณอัตราส่วนระหว่างรัศมีของโซนใสและโคโลนีของเชื้อ พบว่าทั้ง 14 ไอโซเลทมีค่า HC แตกต่างกันตั้งแต่ 1.35 ถึง 12.35 (Table 1) แอคติโนมัยซีท ไอโซเลท Cr10 ให้ค่า HC สูงสุดเท่ากับ 12.35 รองลงมาได้แก่ Cr11 และ Cr1 มีค่า HC เท่ากับ 11.42 และ 11.30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่า HC ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้กับรายงานการศึกษาของจามจุรี และคณะ (2555) ที่คัดแยกแอคติโนมัยซีทที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากมูลสัตว์ และนำมาศึกษาการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากการย่อยสลาย carboxy methyl cellulose ในอาหาร CMC agar เช่นเดียวกับการศึกษาในครั้งนี้ พบว่าแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้ทั้ง 4 ไอโซเลท มีค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณใสต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนี ระหว่าง 1.70-6.20 นอกจากนี้รายงานการคัดแยกแอคติโนมัยซีทจากดิน ฟิลเตอร์เคก และน้ำกากส่า ของทิพย์นภา และคณะ (2556) ซึ่งได้ใช้วิธีการประเมินการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากค่า HC เช่นเดียวกันก็พบว่าแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้จากน้ำกากส่ามีค่า HC สูงสุดเท่ากับ 2.5 แสดงว่าแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้จากแหล่งต่าง ๆ จะมีความหลากหลายของสายพันธุ์ของเชื้อที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการคัดแยกแอคติโนมัยซีทเพื่อให้ได้เชื้อที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้สูง ๆ นั้น แหล่งของตัวอย่างที่นำมาใช้ในการคัดแยกจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควรคำนึงถึงเพื่อให้ได้เชื้อที่มีศักยภาพในการผลิตเอนไซม์ได้สูง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เลือกบริเวณดินตะกอนของบ่อน้ำพุร้อนซึ่งมีการทับถมซากพืชใบไม้ และเศษวัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ รวมทั้งมีสภาวะแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณของแร่ธาตุต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อการเจริญและการผลิตเอนไซม์ของเชื้อแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้

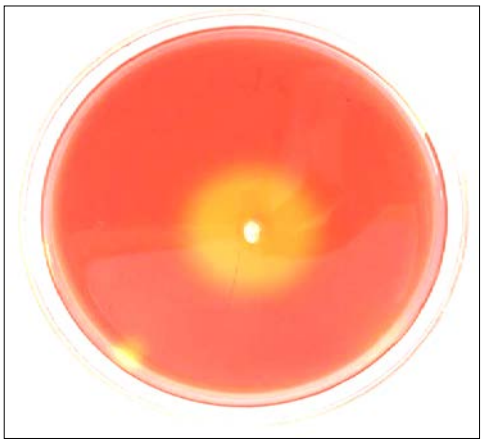


Figure 3 Clear zone of actinomycetes isolate Cr10 on CMC agar

Table 1 The ability to produce the cellulase enzyme of selected actinomycetes

Isolates	Hydrolysis capacity on CMC agar	Isolates	Hydrolysis capacity On CMC agar
Cr10	12.35	Cr14	5.32
Cr11	11.42	Cr15	4.80
Cr1	11.30	Cr17	4.06
Cr4	7.01	Cr16	3.82
Cr13	6.64	Cr12	3.70
Cr2	6.06	Cr8	2.91
Cr7	5.52	Cr6	1.35

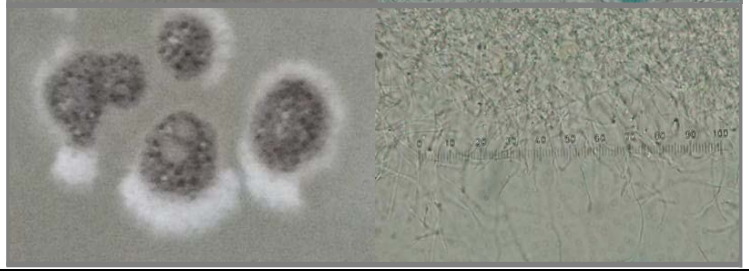
กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสของเชื้อแอคติโนมัยซีทที่คัดเลือก

จากการคัดเลือกแอคติโนมัยซีทที่ให้ค่า HC สูงสุด 3 ไอโซเลท คือ Cr10, Cr11 และ Cr1 มาศึกษากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส เทียบกับกราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส พบว่า Cr1 มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด เท่ากับ 3.35 unit/ml รองลงมา ได้แก่ Cr11 และ Cr10 มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส เท่ากับ 3.22 และ 2.73 unit/ml ตามลำดับ โดยค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่ได้แตกต่างจากค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสของแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้จากน้ำกากส่า ของทิพย์นภา และคณะ (2556) ซึ่งใช้วิธี dinitrosalicylic acid (DNS) reagent เช่นเดียวกับการศึกษาในครั้งนี้แต่ใช้กระดาษกรองเป็นแหล่งคาร์บอนแทน 1% CMC พบว่าให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสเพียง 0.5 unit/ml และรายงานการศึกษากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสของเชื้อแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้จากมูลสัตว์ของจามจุรี และคณะ (2555) ซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ตามวิธี Somogyi-nelson พบว่าแอคติโนมัยซีทที่คัดแยกได้ให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุดเท่ากับ 0.217 unit/ml เท่านั้น ดังนั้นนอกจากสายพันธุ์ของเชื้อ และสภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงเชื้อ แล้ววิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ก็อาจมีผลต่อค่ากิจกรรมของเอนไซม์ที่แตกต่างกันด้วย

สัณฐานวิทยาของแอคติโนมัยซีทที่คัดเลือกได้

จากการศึกษาลักษณะของโคโลนีของแอคติโนมัยซีทที่คัดเลือกได้บนอาหาร starch caseinate agar และลักษณะทางสัณฐานวิทยาเบื้องต้นภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่าลักษณะโคโลนี และเส้นใยของเชื้อแอคติโนมัยซีทที่คัดเลือกได้แสดงดัง Table 2 โดยพบว่า Cr1 โคโลนีมีสีเทาฟูเล็กน้อย ขอบโคโลนีสีขาว เส้นใยภายใต้กล้องเป็นสายยาว Cr11 โคโลนีมีสีขาวขุ่นผิวเรียบ กลางโคโลนีนูนขึ้นมีลักษณะเป็นสีขาว-สีเทา เส้นใยเป็นสายยาว ส่วน Cr10 มีลักษณะโคโลนีผิวหน้าหยาบมีสีเทา ขอบโคโลนีมีสีขาวขุ่นและมีเส้นใยปุยสีขาวรอบ ๆ โคโลนี

Table 2 Morphology and Cellulase activity of the three selected actinomycetes showing high HC value

Isolates	Morphology		Cellulase activity (unit/ml)
	Colonies on starch caseinate agar	Under microscope (100X)	
Cr1			3.35
Cr11			3.22
Cr10			2.73

สรุป

จากการตัวอย่างดินตะกอนจากบ่อน้ำพุร้อนทุ่งนุ้ย จังหวัดสตูล มาคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีทโดยวิธีการ spread plate บนอาหาร starch casinate agar สามารถคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีทได้ทั้งหมด 17 ไอโซเลท ลักษณะทั่วไปของโคโลนีส่วนใหญ่จะมีสีขาวถึงสีเทา ขอบเรียบ บางโคโลนีนูนตรงกลาง ผิวหน้าหยาบ บางโคโลนีผิวหน้าเรียบคล้ายกำมะหยี่หรือผงแป้ง จากการทดสอบความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสเบื้องต้น พบมี 14 ไอโซเลทที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลส จากการประเมินความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากค่า hydrolysis capacity (HC value) พบว่าทั้ง 14 ไอโซเลทมีค่า HC ตั้งแต่ 1.35 – 12.35 โดยไอโซเลท Cr10 มีค่า HC สูงสุดเท่ากับ 12.35 รองลงมาได้แก่ Cr11 และ Cr1 ซึ่งมีค่า HC เท่ากับ 11.42 และ11.30 ตามลำดับ เมื่อนำแอคติโนมัยซีทที่ให้ค่า HC สูงสุดทั้ง 3 ไอโซเลทมาศึกษากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส พบว่า Cr1 ให้ค่า

กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด เท่ากับ 3.35 unit/ml รองลงมาคือ Cr11 และ Cr10 ซึ่งมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสเท่ากับ 3.22 unit/ml และ 2.73 unit/ml ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

จามจุรี เกตุบัวขาว ณิชาภา ชมภู และสุพัตรา ชาวสวน. 2555. **การคัดแยกแอคติโนมัยซีทจากมูลสัตว์เพื่อใช้ในการย่อยสลายวัสดุทางการเกษตรเบื้องต้น**. ปัญหาพิเศษ ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ทิพย์นภา วงษ์คูณ โสภณ บุญลือ และ นันทวัน ฤทธิ์เดช. 2556. การคัดแยกจุลินทรีย์ย่อยสลายเซลลูโลสเพื่อกระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าว (*Oryza sativa* L.) และข้าวโพดหวาน (*Zea mays* L.var. saccharata).**วารสารวิทยาศาสตร์ มข**. 41 (4): 954-966.

ทิพวรรณ แตงสวน. 2553. **การคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากมูลสุกร**. ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ.

ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล และชนิดาภา นวะพิฒ. 2555. การควบคุมโรครากเน่าโคนเน่าของพริกที่มีสาเหตุจากเชื้อรา *Sclerotium rolfsii* ด้วยเชื้อแอคติโนมัยสีท *Streptomyces hygroscopicus* PACCH24 ที่สร้างเอนไซมไคติเนส. **ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**. 14 (1): 10-22.

พิจิตรา ตั้งเขื่อนขันธ์, รุสรินทร์ รุจนานนท์ และอัญชลี อำนาทสมบูรณ์. 2548. **การคัดเลือกเชื้อรา เพื่อผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากวุ้นมะพร้ามที่เป็นเศษเหลือทิ้งจากโรงงาน**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง กรุงเทพฯ.

Abdelnasser, S.S.I and El-diwany. 2007. Isolation and identification of newcellulases producing Thermophilic bacteria an Egyptian hot spring andsome properties of the crude enzyme. **Aust. J. Basic & Appl. Sci**.1(4): 473-478.

Adiguzel, A., Ozkan, H., Baris, O., Inan, K.,Gulluce, M. and Sahin, F. 2009. Identification and characterization of thermophilic bacteria isolated form hot spring in Turkey. **J. Microbiol. method**. 79(3): 321-328.

Chaudhary, N. and Prabhu, S. 2016. Thermophilic Actinomycetes from Hot Water Spring Capable of Producing Enzymes of Industrial Importance. **IJRSB**. 4(6): 29-35.

Chitti Thawai. 2012. Isolation and Characterization of Antibiotic-producing Actinomycetes from hot spring sediment of Thailand, pp.215-219. ***In*** **Conference Proceedings of International conference on BioScience:Biotechnology and Biodiversity**.18-20 June 2012. Serbia.

Hendricks, C. W., Doyle, J. D. and B. Hugley.1995. “A new solid medium for enumerating cellulose-utilizing bacteria in soil.”**J. Appl. Environ. Microbiol**. 61(5): 2016–2019.

Miller, G. L. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**. 31(3): 426-429.

The Convenient Method for Synthesis of Crenatine; an Antimalarial Agent of *Picrasma spp.*

Chalerm Saiin[1*], Busaban Sirithunyalug[2], Apiwat Baramee[3], Kiyosei Takasu[4], Masataka Ihara[5]

ABSTRACT

The convenient method for synthesis of crenatine was developed. This method composed of four steps. First step, 1-Ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline was synthesized in a high yield by a reaction of tryptamine with propionaldehyde. Second step, benzolation of 1-Ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline with benzoyl chloride gave N-1 protected compound, 1-ethyl-2-benzoyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline. Third step, Treatment of 1-ethyl-2-benzoyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline with DDQ provided a mixture of 1-ethyl-2-benzoyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline and by product, keto amide. Finally step, the reaction was carried out in the refluxed mixture of benzene and *p*-toluenesulfonic acid monohydrate in the Dean-Stark apparatus. Compound 1-ethyl-2-benzoyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline was methylated with dimethoxypropane, then oxidized with *p*-chloranil and finally lost the benzoyl moielty to provide Crenatine. This method provided the good yield and easier than previous reports. It will be useful to prepare crenatine for pharmacological evaluations in the future.

Key Words: Crenatine, 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline, synthetic method

*Corresponding author; e-mail address: **Chalerms@nu.ac.th**

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

[2]Department of Pharmaceutical Science, Faculty of Pharmacy, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

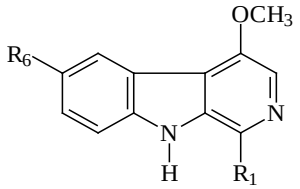
[3]Department of Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

[4]Graduate School of Pharmaceutical Sciences, Kyoto University, Kyoto, Japan

[5]Laboratory of Tropical Diseases, Drug Discovery Science Research Center, Hoshi University, Tokyo, Japan

INTRODUCTION

Crenatine (1-ethyl-4-methoxy-β-carboline) is first isolated and identified from *Picrasma crenata* Vell. (Sánchez, 1971). Then, Ohmoto *et al.* (1987) and Arbain and Sargent (1987) isolated and identified crenatine from the bark of *Picrasma javanica* growing in Indonesia. Saiin *et al.* (2016) found that the chloroform extract of Thai *P. javanica* Bl. stembark showed the high level of an *in vitro* antimalarial activity against *P. falciparum* K1. Further analysis by GC-MS technique indicated two compounds of alkaloidal portion, 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline and crenatine in very low percentage yield. Indeed, Takasu *et al.* (2006) already reported that crenatine was effective against *P. falciparun* (chloroquine sensitive strain FCR-3) with an EC_{50} of 1.6 x 10^{-5} M and cytotoxic to mouse mammary tumor FM3A cell with EC_{50} of 1.8 x 10^{-5} M. Its selective toxicity (EC_{50} value for FM3A/EC_{50} for *P. falciparum*) was only 1.1, while its β–carbolinium salt (1-ethyl-2-methyl-4-methoxy-β-carbolinium) selective toxicity was >32.



(1); 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline (dehydrocrenatine): R_1 = CH=CH_2, R_6 = H

(2); 6-hydroxy-4-methoxy-1-vinyl-β-carboline: R_1 = CH=CH_2, R_6 = OH

(3); 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline (crenatine): R_1 = CH_2CH_3, R_6 = H

Figure 1 Chemical structure of indole alkaloids isolated from Thai *P. javanica* (Pavanade *et al*., 1988 & Saiin *et al*., 2016)

Herein, the convenient method for synthesis of crenatine was reported. It will be useful to prepare crenatine for pharmacological evaluations in the future.

MATERIALS AND METHODS

Synthetic plan

Crenatine was synthesized by combined Cook's method (Cain *et al*., 1982 & Hagen *et al*., 1989) and Suzuki's method (Suzuki *et al*., 1999) with some modification.

Experiments

Experiment 1; Synthesis of 1-ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (4)

RUN 1: The mixture of tryptamine (2.0099 g, 12.54 mmol) and 10 % MeOH (12.50 mL) was added with propionaldehyde (1.35 mL, 18.83 mmol), and conc. H_2SO_4 (0.70 mL, 6.78 mmol). The reaction was refluxed for 6.5 h. The reaction mixture was evaporated to remove MeOH, basified with 28 % ammonia solution (2 mL) and extracted with ethyl acetate (EtOAC) (4 x 10 mL). The extract was

washed with 10 % NaCl solution (1 x 20 mL), dried with potassium carbonate (K_2CO_3) and evaporated to yield sticky brown product (4) (1.5708 g, 62.61 %).

RUN 2: The mixture of tryptamine (7.0083 g, 43.74 mmol) and 10 % MeOH (45.00 mL) was added with conc. H_2SO_4 (2.40 mL, 23.25 mmol), and propionaldehyde (9.50 mL, 13.25 mmol). The mixture was refluxed for 6.5 h, epavorated to remove MeOH, basified with 28 % ammonia solution (6.9 mL), and extracted with EtOAc (4 x 60 mL). The EtOAc extract was washed with 10 % NaCl solution (1 x 50 mL), dried (K_2CO_3), evaporated to yield sticky brown product (10.1251 g, 115.66 %) that was crystallized in Et_2O to provide white fine crystal (2.0526 g). The filtrate obtained from crystallization was concentrated and chromatographed through silica gel column (column diameter 2.5 inch, silica gel 60 g) with suction using EtOAc (100 mL) and $CHCl_3$-MeOH (1-1) as eluent, the result provided pale yellow product (5.5637 g). Total yield of (**4**) was 7.6152 g (86.99 %).

Experiment 2; Synthesis of 1-ethyl-2-benzoyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (5)

RUN 3: The solution of (**4**) (1.5708 g, 785 mmol) in pyridine-benzene (11.75-23.50 mL) was added by benzoyl chloride (1.65 mL, 14.179 mmol) and gradually increase the temperature from ambient temperature to 60 °C, and maintained heating at this temperature with total time was 30 min. After the reaction mixture was cooled, the reaction was quenched with water (95 mL) and then two layers were separated. Aqueous layer phase was extracted with benzene (2 x 40). Combined organic layer was washed with water (2 x 50 mL), saturated Na_2CO_3 solution (3 x 50 mL), water (4 x 95 mL), and 10 % NaCl solution (2 x 50 mL). And then, the solution was dried (Na_2SO_4) and evaporated to yield sticky oil brown product (2.7836 g, 116.39 %). This product was chromatographed on silica gel column using EtOAc as eluent, and finally crystallized in MeOH to yield white fine crystal (**5**) (1.1385 g, 47.69 %)

RUN 4: Benzoyl chloride was added to the mixture of (**4**) (3.6625 g, 18.30 mmol), dichloromethan (50.00 mL), 4-dimethyaminopyridine (DMAP) (217.2 mg, 1.78 mmol), and triethylamine (3.00 mL, 21.35 mmol) and then gradually heated to 60 °C, and maintained heating at this temperature; total time was 30 min. After the reaction mixture was cooled, added 1 *N* NaOH solution (30 mL) and two layers were separated. Then, aqueous layer was extracted with dichloromethane (2 x 30 mL). Combined organic layer was dried (Na_2CO_3), and evaporated, resulted in sticky brown product (9.3911 g) that was crystallized in MeOH to provided pale yellow fine crystal (2.7383 g). The supernatant was let to provide pale yellow fine crystal (1.9951 g). The total amount of (**5**) was 4.7334 g (85.04 %).

Experiment 3; Synthesis of 1-ethyl-2-benzoyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (6)

RUN 5: To the mixture of (5) (0.5069 g, 1.67 mmol) and 2,3-dichloro-5,6-dicyano-1,4-benzo-quinone (DDQ) (0.8347 g, 3.68 mmol) sank in dry ice-acetone bath was added slurry (-10 °C) of

tetrahydrofuran-water (THF-H_2O) (9-1, 50 mL) and stirred for 2.5 h. Then, the blue mixture was stirred at ambient environment for 6 h. The red mixture was evaporated, added 1 *N* NaOH solution (30 mL) and extracted with EtOAc (4 x 30 mL). The extract was washed with 10 % HCl solution (1 x 30 mL), dried (Na_2CO_3) and evaporated to yield brown product (0.5246 g). This product was chromatographed on silica gel column using EtOAc-Hexane (2:1) as eluent. The result provided (**6**) (0.2619 g, 49.38 %) and by product (**7**) (0.1417 g).

RUN 6: To the mixture of (5) (2.0195 g, 6.64 mmol) and DDQ (3.2673 g, 14.39 mmol) sank in dry ice-acetone bath was added slurry (-10 °C) of THF-H_2O (9-1, 50 mL) and stirred for 3 h. Then the blue mixture was stirred at ambient temperature for 18 h. The red mixture was poured into 1 *N* NaOH solution (50 mL) and extracted with EtOAc (4 x 100 mL). The extract was washed with 10 % HCl solution (1 x 50 mL), dried (Na_2CO_3) and evaporated to obtain brown product (1.9307 g). This product was chromatographed on silica gel column using EtOAc-Hexane (2-1) as eluent. The result provided (**6**) (1.1358 g) crystallized in MeOH to yield white crystal (798.6 mg, 37.81 %) and by product (**7**) (285.3 mg) crystallized in MeOH to yield white crystal (167.3 mg, 7.8 %).

Experiment 4; Synthesis of 1-ethyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (8)

RUN 7: The mixture of (**6**) (0.0825 g, 0.26 mmol) and 6 *N* NaOH solution (30 mL) was refluxed for 3 h. After cooling, the mixture was extracted with EtOAc (5 x 30 mL). The extract was dried (Na_2CO_3) and evaporate to yield white fine crystal (**8**) (47.3 mg, 85.19 %).

RUN 8: The mixture of (**6**) (0.2619 g, 0.82 mmol) and 6 *N* NaOH solution (30 mL) was refluxed for 3 h. After cooling, the reacted mixture was extracted with EtOAc (5 x 40 mL). The extract was evaporate to yield white solid (253.7 mg) that was crystallized in MeOH to provide white fine crystal (**8**) (160.0 mg, 90.78 %).

Experiment 5; Synthesis of 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline (3) from (8)

RUN 9: A solution composed of (**8**) (0.1455 g, 0.68 mmol) in methanol (10.0 mL), trimethyl orthoformate ($(CH_3O)_3CH$) (2.0 mL) and *p*-toluenesulfonic acid (0.250 g, 1.45 mmol) was refluxed for 24 h. Evaporation of the reaction solution gave a residue which was disolved in EtOAc (30 mL). The organic fraction was washed with saturated aqueous $NaHCO_3$ (20 mL) and aqueous 2 *N* HCl (4 x 20 mL). The acidic aqueous extracts were combined, and the pH of the solution was adjusted to 8 (solid Na_2CO_3), followed by extraction with EtOAc (3 x 40 mL). The EtOAc extracted were combined, dried (Na_2CO_3) and evaporated to provide crude product of 13.4 mg which was chromatographed through a silica gel column (EtOAc-MeOH) (9:1) as eluent, Al_2O_3 column (EtOAc-Hexane 9-1 as eluent) and then preparative TLC plate (EtOAc as eluent) to provide 2.2 mg (1.53 %) of (**3**) and 2.0 mg (1.30 %) of 1-ethyl-4-hydroxy-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (**9**).

Experiment 6; Synthesis of 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline (3) from (6)

RUN 10: The mixture of benzene (7.0 mL) and *p*-toluenesulfonic acid monohydrate (0.0328 g, 0.17 mmol) was refluxed in Dean-Stark apparatus for 1 h and cooled to ambient temperature. The reaction mixture was added (**6**) (0.0502 g, 0.16 mmol). Then the green mixture was added dimethoxypropane ($(CH_3O)_2C(CH_3)_2$) (0.06 mL, 0.49 mmol) and stirred for 1 h. After that, the mixture was added *p*-chloranil (0.0788 g, 0.32 mmol) and stirred for 20 h. The reacted mixture was added 1 *N* NaOH solution (20 mL) and extract with chloroform (3 x 30 mL). The extract was dried (Na_2CO_3) and evaporated to yield brown product. This product was chromatographed [silica gel column, $CHCl_3$-MeOH (19-1)] to obtain brown product that was further chromatographed [silica gel column, EtOAc-Hexane (9-1)] to provide white fine crystal **(3)** (0.0187 g, 52.41 %).

RUN 11: The mixture of benzene (55.0 mL) and *p*-toluenesulfonic acid monohydrate (0.4606 g, 2.42 mmol) was refluxed in Dean-Stark apparatus for 1 h and cooled to ambient temperature. The reaction mixture was added (**6**) (0.7014 g, 2.20 mmol). Then, the green mixture was added dimethoxypropane (0.0.81 mL, 6.61 mmol) and stirred for 1 h. After that, the mixture was added *p*-chloranil (1.0884 g, 4.43 mmol) and stirred for 20 h. The reacted mixture was poured into 5 % NaOH solution (60 mL) and extracted with $CHCl_3$ (3 x 100 mL). The extract was washed with 10 % NaCl (1 x 100 mL), dried (Na_2CO_3) and evaporated to yield brown product (0.8835 g). This product was chromatographed [silica gel column, $CHCl_3$-MeOH (19-1)] to obtain brown product that was crystallize in MeOH to provide pale yellow fine crystal (**3**) (0.3909 g, 78.41 %).

Experiment 7; synthesis of 1-ethyl-2-methyl-4-methoxy-β-carboline (10)

RUN 12: The mixture of (**3**) (0.0230 g, 0.10 mmol), tetramethylene sulfone (0.9 mL) and methyl iodide (0.72 mL, 11.56 mmol) was heated at 50 °C for 17 h. The mixture was cooled and added ether-MeOH (3 mL-2 drop) and $CHCl_3$ (3 x 1 mL). The result provided white fine crystal (**10**) (0.0286 g, 76.61 %)

Structure elucidation

^{1}H-NMR spectra (300 MHz) were recorded on Varian Gemini 2000 FT-NMR spectrometer. Chemical shifts were relative to tetramethylsilane (TMS). Electron ionization (EI) mass spectra were recorded on a JEOL-JMS-O1SG-2 instrument.

1-ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (4); EI-MS *m/z* 200 (M^+, 75.40%), 183 (3.93%), 171 (100%), 156 (29.35%), 144 (30.32%), 85 (38.75%); ^{1}H NMR ($CDCl_3$) δ 1.07 (t, *J* = 7.42 Hz, 3H, 1-$CH_2\underline{CH_3}$), 1.63-1.76 (m, 1H, 4-CH_2), 1.87-1.98 (m, 1H, 4-CH_2), 2.72-2.78 (m, 2H, 1-$\underline{CH_2}CH_3$), 2.99-3.078 (m, 1H, 3-CH_2), 3.34-3.41 (m, 1H, 3-CH_2), 4.00-4.04 (m, 1H, 1-H), 7.07-7.18 (m, 2H, 6-H/7-H), 7.30-7.33 (d, 1H, *J* = 7.97 Hz, 8-H), 7.48-7.51 (d, *J* = 7.14 Hz, 1H, 5-H), 7.77 (s br, 1H, NH).

1-ethyl-2-benzoyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (5); EI-MS *m/z* 304 (M^+, 11.98%), 275 (38.05%), 105 (100%); ^{1}H NMR ($CDCl_3$) δ 1.17 (t, *J* =7.42 Hz, 3H, 1-$CH_2\underline{CH_3}$), 1.92-2.09 (m, 2H, 4-CH_2), 2.66-2.82 (m, 2H, 1-$\underline{CH_2}CH_3$), 3.49-3.58 (m, 1H, 3-CH_2), 3.90-3.97 (m, 1H, 3-CH_2), 5.86 (t, *J* = 6.87 Hz, 1H, 1-H), 7.08-7.20 (m, 2H, 6-H/7-H), 7.32-7.34 (d, 1H, *J* = 7.97, 8-H), 7.45 (s br, 6H, 5-H/By-H), 8.13 (s br, 1H, NH).

1-ethyl-2-benzoyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (6); EI-MS *m/z* 318 (M^+, 26.64%), 289 (10.95%), 213 (38.19%), 105 (100%); ^{1}H NMR ($CDCl_3$) δ 1.18 (t, *J* =7.42 Hz, 3H, 1-$CH_2\underline{CH_3}$), 2.06-2.15 (m, 2H, 1-$\underline{CH_2}CH_3$), 4.19 (d, *J* = 17.58, 1H, 3-CH_2), 4.41 (d, *J* = 17.58, 1H, 3-CH_2), 6.40 (t, *J* = 6.87, 7.97 Hz, 1H, 1-H), 7.15-7.28 (m, 4H include $CHCl_3$) 7.41-7.56 (m, 6H), 8.11 (d, 1H, *J* = 8.24), 10.65 (s br, 1H, C=O).

1-ethyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (8); ^{1}H NMR (DMSO) δ 1.01 (t, *J* = 7.42, 7.14 Hz, 3H, 1-$CH_2\underline{CH_3}$), 2.49-1.70 (m, 2H, 1-$\underline{CH_2}CH_3$), 3.26 (d, *J* = 16.21 Hz, 1H, 3-CH_2), 3.38 (d, *J* = 16.48 Hz, 1H, 3-CH_2), 4.02-3.99 (m, 1H, 1-H), 7.16-7.10 (m, 2H, 6-H/7-H), 7.42 (d, *J* = 8.24, 1H, 8-H), 7.91 (d, *J* = 7.14 Hz, 5-H).

1-ethyl-4-hydroxy-β-carboline (9); ^{1}H NMR ($CDCl_3$) δ 1.48 (t, *J* =7.42, 7.69 Hz, 3H, 1-$CH_2\underline{CH_3}$), 3.15 (q, *J* = 7.42, 7.69, 7.69 Hz, 2H, 1-$\underline{CH_2}CH_3$), 7.28-7.32 (m, 1H, 8-H), 7.52-7.58 (m, 2H, 6-H/7-H), 7.83 (d, *J* = 5.49 Hz, 1H, 3-H), 8.12 (d, *J* = 7.97 Hz, 1H, 5-H) 8.24 (s br, 1H, NH), 8.40 (d, *J* = 5.49 Hz, 1H, 4-OH).

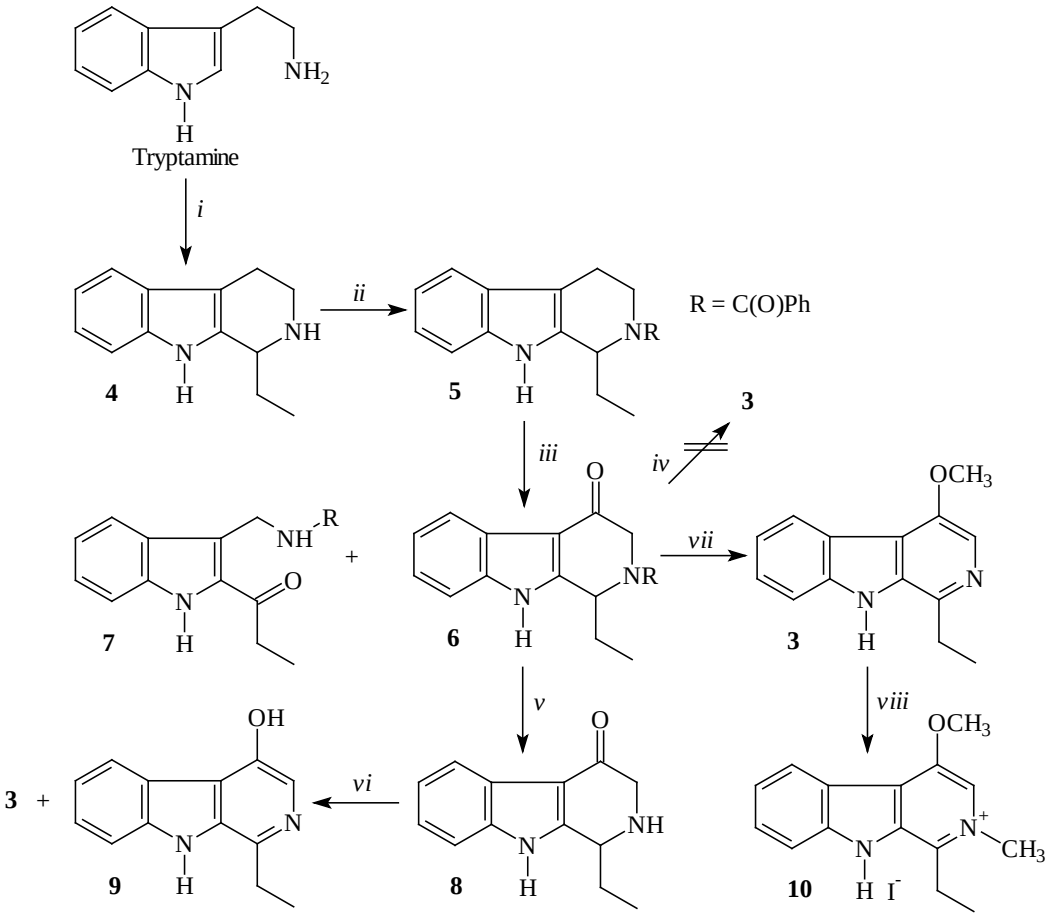
1-ethyl-4-methoxy-β-carboline, Crenatine (3); EI-MS *m/z* 226 (M^+, 100%), 211 (70.68%), 198 (11.51%), 183 (47.04%); ^{1}H NMR ($CDCl_3$) δ 1.45 (t, *J* = 7.69 Hz, 3H, 1-$CH_2\underline{CH_3}$), 3.08 (q, *J* = 7.69 Hz, 2H, 1-$\underline{CH_2}CH_3$), 4.13 (s, 3H, -OCH_3), 7.30-7.32 (m, 1H), 7.50-7.52 (m, 2H, 6-H/7-H), 8.01 (s, 1H), 8.18 (s br, 1H, NH), 8.33 (d, 1H, *J* = 7.69)

1-ethyl-2-methyl-4-methoxy-β-carbolinium (10); EI-MS *m/z* 240 (M^+, 100%), 225 (65.59%), 211 (51.87%), 197 (34.69%), 142 (67.78%); ^{1}H NMR (DMSO) δ 1.34 (t, 3H, *J* = 7.42, 7.97 Hz), 3.39-3.45 (m, 2H), 7.40-7.45 (m, 1H), 7.75-7.77 (m, 2H), 8.31 (d, 1H, *J* = 8.24 Hz), 8.43 (s, 1H)

RESULTS AND DISCUSSION

The convenient method for synthesis of crenatine **(3)** was developed (Scheme1). Crenatine (**3**) was synthesized by combined Cook's method (Cain *et al.*, 1982; Hagen *et al.*, 1989) and Suzuki's method (Suzuki *et al.*, 1999) with some modification. First, 1-ethyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (**4**) was synthesized in the high yield by a reaction of tryptamine with propionaldehyde. Benzolation of (**4**) with benzoyl chloride gave N-1 protected compound, 1-ethyl-2-benzoyl-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (**5**). Treatment of (**5**) with DDQ provided a mixture of 1-Ethyl-2-benzoyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (**6**) and side product **(7)**. When compound (**6**) was refluxed with methanol in

the present of trimethyl orthoformate and *p*-toluenesulfonic acid, the desired product Crenatine (**3**) did not occur. Thus, compound (**6**) was hydrolyzed with sodium hydroxide to yield 1-Ethyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (**8**). Compound (**8**), then, methylated with methanol in the presence of trimethyl orthoformate and *p*-toluensulfonic acid, the result provided the target compound crenatine (**3**) and 1-ethyl-4-hydroxy-β-carboline (**9**) in low yield.



Scheme1. Reagents and conditions: (*i*) C_2H_5CHO, 10% MeOH, conc. H_2SO_4, reflux (6.5h); (*ii*) PhC(O)Cl, DMAP, Et_3N, CH_2Cl_2 60°C (0.5h); (*iii*) DDQ, THF/H_2O (9:1), -78°C (3h), at (18h); (*iv*) MeOH, *p*-TSA, $(CH_3O)_3CH$, reflux (24h); (*v*) 6 *N* NaOH, reflux (3h); (*vi*) MeOH, *p*-TSA, $(CH_3O)_3CH$, reflux (24h); (*vii*) $(CH_3O)_2C(CH_3)_2$, *p*-TSA, chloranil, benzene, at (20h); (*viii*) CH_3I, tetramethylene sulfone, 50°C (17h)

Finally, the high yield of crenatine (**3**) was achieved when modified Suzuki's method that used to synthesized 4-methoxy-8-tosyloxy-β-carboline from 2-formyl-4-oxo-8-tosyloxy-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (Suzuki *et al*., 1999). The reaction was carried in the refluxed mixture of benzene and *p*-toluenesulfonic acid monohydrate in the Dean-Stark apparatus. Compound (**6**) was methylated with dimethoxypropane, then oxidized with *p*-chloranil and finally lost the benzoyl moiety to provide

crenatine (**3**). In addition, crenatine (**3**) was methylated with iodomethane in tetramethylenesulfone to give the corresponding carbolinium salt (**10**).

CONCLUSION

The convenient method for synthesis of crenatine was developed. This method composed of four steps by using an inexpensive chemical; tryptamine as starting material. Our method was shortening than Suzuki's method and provided the good yield. In addition, this method was easy to set the reactions. Now, we are applying this method for synthesis of others two indole alkaloids isolated from Thai *P. javanica*, 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline and 6-hydroxy-4-methoxy-1-vinyl-β-carboline.

REFERENCES

Arbain, D. and M.V. Sargent. 1987. The alkaloids of *Picrasma javanica*. **Aust J chem.** 9:1527-1536.

Cain, M., R. Martei and J.M. Cook. 1982. Dichlorodicyanoquinone oxidations in the indole area. Synthesis of crenatine. **J Org Chem.** 47(25):4933-4936.

Hagen, T.J., K. Narayanan, J. Names and J.M. Cook. 1989. DDQ oxidations in the indole area. Synthesis of 4-alkoxy-β-carbolines including the natural products crenatine and 1-methoxycanthin-6-one. **J Org Chem.** 54(9);2107-2178.

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. Antimalarial activity of a Thai medicinal plant *Picrasma javanica* Bl. **Phytother. Res.** 2:33-36.

Saiin, C., B. Sirithunyalug, R. Rattanajak, K. 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.

Sánchez, E. and J. Comin.1971. Two new β-carboline alkaloids from Aeschrion crenata. **Phytochemistry**. 10(9):2155-2159.

Suzuki, H., M. Unemoto, M. Hagiwara, T. Ohyama, Y. Yokoyama and Y. Murakami. 1999. Synthetic studies on indoles and related compounds. Part 46. First total synthesis of 4,8-dioxygenated β-carboline alkaloids. **J Chem Soc, Perkin Trans1.** 1717-1723.

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):653-61.

Standard Karyotypes of four species of bufonid frogs (Anura : Bufonidae) from Thailand

Thavorn Supaprom[1*], Thitipong Panthum[1], Kannika Pratoompak[1] and Kaew Udomsirichakorn[1]

ABSTRACT

The mitotic Karyotypes of 4 bufonid frogs species collected from the natural population in Thailand were analyzed after *in vivo* colchicine treatment using conventional cytogenetic method. The diploid chromosome complement of all bufonid frogs species studied was 22 (2n=22). The standard karyotypes of *Duttaphrynus melanostictus* (formerly *Bufo melanostictus*) , *Ingerophrynus parvus* (formerly *Bufo parvus*) and *Phrynoidis asper* (formerly *Bufo asper*) consisted of 6 pairs of large and 5 pairs of small chromosomes, but in *Leptophryne borbonica* consists of 7 pairs of large and 4 pairs of small chromosomes. However, the karyotype of *Duttaphrynus melanostictus* exhibited clearly a knob-like projection on the tip of short arm of small metacentric chromosome no.11 which was the chromosome marker in this bufonid species. Karyotypes and chromosome morphologies of 4 bufonid frog species at chromosomal level were found to be highly conserved.

Key words: standard karyotype, diploid chromosome number, chromosome marker, bufonid frog

* Corresponding author; e-mail address: thavorn_s@yahoo.com

[1]Department of Biological Science, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190

INTRODUCTION

Amphibian anurans have advantages for cytogenetic studies because of their relatively low chromosome number and considerably large size. Most investigations on amphibian anuran cytogenetics have been performed by using a conventional staining method that clearly reveals the centromere position, the secondary constriction and the relative lengths of chromosome arms (Morescalchi, 1973). The gross chromosome numbers of 1,000 amphibian species were reported by Kuramoto (1990). But only 837 of the 3,521 anuran species have been analyzed chromosomally (King, 1991). The amphibian fauna of Thailand consist of about 130-140 species (Chan-Ard et al., 1999 ; Khonsue and Thirakhupt, 2001). Very little is known about cytogenetic knowledge and data of amphibian species in Thailand. Studies of chromosome number, chromosome marker, and standard karyotype of amphibian fauna have provided a wealth of baseline data and basic knowledge, led to the development of large body of evolutionary theory, and formed the underpinning of a considerable body of research in the area of systematic and conservative biology. The lack of basic cytogenetic baseline knowledge and data is one of many problems which to make non-effectiveness for application, conservation and management of amphibians in Thailand.

The bufonid frogs were nearly world-wide distributed in temperate and tropical zone. However, Southeastren Asia and Archipelago have representatives of 7 bufonid genera: *Bufo, Ansonia, Psuedobufo, Ophryophryne, Pelophryne, Pedostibes* and *Leptophryne* (Taylor, 1962). In Thailand, only 4 of these are represented, *Bufo* by 5 species: *Ansonia* by 4 species: *Pedostibes* and *Leptophryne* each represented by a single known species (Khonsue and Thirakhupt, 2001). *Bufo melanostictus* most frequently seen in Thailand was ubiquitous and widespread species. In 1975, N. Nankasem first studied karyotypes of *Microhyla ornate*, *Rana limnochalis* (= *Fejervarya limnochalis*) and *Bufo melanostictus*. Later on, the chromosome number, the position of secondary constriction and standard karyotype of some amphibians were investigated by other authors such as Phatinawin (1988), Supaprom et al. (2002; 2004; 2005; 2006). Here, we reported the standard karyotypes with detail description of four species of bufonid frogs commonly found in Thailand.

MATERIALS AND METHODS

The mature animals of 4 bufonid frog species: *Duttaphrynus melanostictus* (formerly *Bufo melanostictus*), *Ingerophrynus parvus* (formerly *Bufo parvus*) and *Phrynoidis asper* (formerly *Bufo asper*) and *Leptophryne borbonica*, (Fig. 1) were caught from the sides of mountain creeks, on marsh areas and forest grounds during the first rain of the season and the winter season by using the nets and battery light.

The mitotic chromosomes were prepared directly from bone marrow cells after *in vivo* colchicinetreatment. The preparation of cell suspension, hypotonic treatment and fixation of the cell followed the methods described by Schmid (1978) with slight modification.

Figure 1 Photographs of all 4 species of bufonid frogs

At least 25 well – spread metaphases which exhibited the greatest size uniformity and straightness for each species of bufonid frogs were observed for analysis of the chromosome number and the demonstration of secondary constriction. At least 10 metaphases of them were selected for photomicrography. Mitotic chromosomes were examined and recorded on digital camera under a bright – field microscope.

Photomicrographs of at least 10 well – spread metaphase chromosome sets were selected for each species of bufonid frogs for ideogram construction and karyotyping. In order to construct ideogram and karyotype the lengths of the short and long arms (characterized by relative length of chromosome) and the centromeric ratio were measured using a standard ruler. Relative length of chromosome is a percentage of the total length of the entire chromosome complement and is given by,

$$\text{Relative length of chromosome} = \frac{\text{chromosome length x 100}}{\text{total chromosome length}}$$

The chromosome pairs from photomicrographic prints were cut and arranged according to size in parallel rows and in order of decreasing mean relative length. The terminology for chromosome morphology follows that of Green and Sessions (1991).

RESULTS AND DISCUSSION

The diploid chromosome complements of 4 bufonid species were successfully investigated. We found that the diploid chromosome number of these bufonid frogs is 22 (2n= 22). Standard karyotypes, sizes and shapes of chromosomes and chromosome markers of each bufonid species were shown in Figure 2 and were detail described below. The relative length (RL) and centromeric ratio (CR) with standard deviation (±SD) of 4 species of bufonid frogs were shown in Table 1.

The 4 bufonid species included in this report were *Duttaphrynus melanostictus, Ingerophrynus parvus* and *Phrynoidis asper and Leptophryne borbonica.* The chromosome complement of all species exhibited 22 biarmed chromosomes (2 n= 2 2). The karyotypes of *Duttaphrynus melanostictus*, *Ingerophrynus parvus* and *Phrynoidis asper* consisted of 6 pairs of large and 5 pairs of small chromosome pairs. Standard karyotypes, size, shape and chromosome marker were described below.

Duttaphrynus melanostictus : Most of large chromosomes were metacentric (Nos 1,2,3,5 and 6). Only chromosome No.4 was submetacentric shape. In small chromosomes, pairs 7, 9, 10 and 11 were metacentric, only pair 8 was submetacentric morphology. The smallest chromosome No. 11 showed a knob-like projection on the tip of short arm (11p).

Ingerophrynus parvus : The karyotype of *I. parvus* was generally similar to that of *D. melanostictus* described above. The differences between these two species' karyotypes were observed in chromosome No.3 of large group which had a submetacentric shape in *I. parvus* but had a metacentric shape in *D. melanostictus* and chromosome No.10 of small group which had a submetacentric shape in *I. parvus,* whereas chromosome No. 8 of small group which had a submetacentric shape in *D. melanostictus.* Moreover, no clear chromosome marker was detected in this species.

Phrynoidis asper : The general pattern of mitotic karyotype of this species was very similar to that of *D. melanostictus*. A karyotypic difference between these two species was observed only in chromosome No.2 which had a submetacentric shape in *B. asper* but had a metacentric shape in *D. melanostictus.* A secondary constriction could not be found in this species.

Leptophryne borbonica : The mitotic karyotype consisted of 22 biarmed chromosomes. The general pattern of standard karyotype of this species was similar to those of the three species described above. Nevertheless, the metacentric shape was commonly found in both large and small chromosome pairs. Only chromosome No.4 had a submetacentric morphology. No clear secondary constriction was shown in this species.

No heteromorphic pair of chromosomes has been observed in males and females of all bufonid frogs studied.

The bufonid frogs of Thailand include 4 genera with a total of 11 known species that are widely distributed throughout the country (Chan-Ard et al., 1999 ; Khonsue and Thirakhupt, 2001). The karyological information of many genera in Thailand is somewhat limited. In this study, the diploid chromosome number in 4 species of the genus *Bufo* and 1 species of the genus *Leptophryne* is 22. Chromosome number of *Duttaphrynus melanostictus, Ingerophrynus parvus* and *Phrynoidis asper* is similar to the report of Kuramoto (1990). Bogart (1968) reported that the chromosome complements in all Bufo species studied were 22 biarmed chromosomes of metacentric and submetacentric shapes, except *in B. regularis* of Africa. In *B. regularis* species has only 20 chromosomes, but there are other bufonid species of Africa that have 22 chromosomes. White (1961) asserted that there was little evidence that evolutionary changes in the chromosome number of animals have occurred through duplication or deletions of whole chromosomes, but it is frequently found that a pair of metacentric chromosomes in one species is represented by two pairs of acrocentrics in a related species. No arocentric or telocentric chromosomes have been found in any of the 22 - chromosomes *Bufo* species, and it is unlikely the centric fusion of acrocentric or telocentric chromosomes gave rise to the 20 chromosome group of bufonid frogs (Bogart, 1972). It is possible that fusion of two chromosomes resulted in the chromosome-number dichotomy in *Bufo* species, and chromosome No. 11 or the smallest chromosome of a 22-chromosome species was probably involved in the chromosome number reduction. It is difficult to determine exactly how the chromosome combined or which chromosomes were involved in the combination. In our opinion, the combined chromosomes banding techniques, such as late replication banding, C-banding and Q-banding, may determine exactly how the chromosomal rearrangements in the *Bufo* species. Bogart (1972) stated that most of the *Bufo* species in various parts of the world have 6 large pairs and 5 smaller pairs of chromosomes (6+5 karyotype formula). The chromosome No. 6 of large group may probably be a intermediate size, because of relative length (RL) in range about 7.99-8.51. Our findings in the 3 species of the genus *Bufo* seem to be in accordance with the findings of Bogart (1972). We attempt here to apply chromosomal evidence in outlining the paths of karyotypic evolution in the genus *Bufo.* It is unlikely that any contemporary species still possesses a karyotype that has not morphologically changed. It is undoubtedly true that many species of the genus *Bufo* are highly conservative in karyotypes and chromosome morphologies. We consider that more useful information can arise after the cytogenetic study of a greater number of species of this genus. *Leptophryne borbonica* has 7 large pairs and 4 smaller pairs of chromosome (7+4 karyotype formula). In our opinion, the 7+4 karyotype pattern may

be characterized for this bufonid frog group. Unfortunately, only 1 species of the genus *Leptophryne* was investigated in this study. Therefore, more further investigation is required to confirm this issue.

Figure 2 Standard karyotypes of 4 species of bufonid frogs showing size and shape of chromosomes (5,000X magnified). Arrow indicates a knob-like projection. a) *D. melanostictus* ; b) *I. parvus* c) *P. asper* and d) *L. borbonica*,

Table 1. Chromosome number (1-11), relative length (RL) and centromeric ratio (CR) with standard deviation (±SD) of 4 species of bufonid frogs. M = metacentric (CR= 1.00-1.67); SM = submetacentric (CR=1.68-3.00). * chromosome showing a knob-like projection.

Name		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	RL	16.37±0.20	16.33±0.07	13.67±0.45	12.24±0.05	10.44±0.29	8.49±0.32	5.24±0.05	5.16±0.01	4.53±0.01	4.15±0.17	3.40±0.12
D. melanostictus	R	1.21±0.04	1.17±0.09	1.35±0.08	1.75±0.11	1.14±0.12	1.25±0.02	1.52±0.22	1.73±0.06	1.08±0.04	1.15±0.04	1.08±0.02
	Type	M	M	M	SM	M	M	M	SM	M	M	M*
	RL	17.07±0.23	16.30±0.65	13.96±0.52	11.48±0.07	10.61±0.43	7.99±0.24	5.25±0.43	4.83±0.06	4.20±0.05	4.16±0.05	4.14±0.03
I. parvus	CR	1.16±0.08	1.32±0.01	1.70±0.14	1.78±0.02	1.08±0.02	1.04±0.36	1.20±0.11	1.01±0.11	1.11±0.05	1.74±0.09	1.00±0.02
	Type	M	M	SM	SM	M	M	M	M	M	SM	M
	RL	16.17±0.67	13.78±0.45	13.65±0.45	12.91±0.85	11.23±0.66	8.51±0.05	5.66±0.05	4.90±0.04	4.47±0.07	4.41±0.08	3.78±0.19
P. asper	CR	1.42±0.31	1.68±0.11	1.10±0.07	1.74±0.01	1.15±0.04	1.23±0.03	1.28±0.03	1.70±0.03	1.25±0.07	1.34±0.02	1.38±0.41
	Type	M	SM	M	SM	M	M	M	SM	M	M	M
	RL	17.08±0.08	13.38±0.12	12.77±0.64	11.02±0.19	9.66±0.18	9.46±0.04	8.48±0.49	5.40±0.01	4.78±0.18	4.35±0.10	3.62±0.29
L. borbonica	CR	1.34±0.07	1.29±0.16	1.57±0.12	1.88±0.01	1.02±0.01	1.35±0.04	1.46±0.34	1.13±0.09	1.12±0.05	1.18±0.23	1.07±0.04
	Type	M	M	M	SM	M	M	M	M	M	M	M

CONCLUSION

Only 4 species of bufonid anuran amphibains studied have been karyotyped with brief descriptions of the standard karyotypes and the position of chromosome marker that can be used as cytotaxonomic characters. On the chromosomes of four bufonid frogs investigated, the metacentric and submetacentric shapes are commonly found. On the chromosomes of the bufonid frogs are all biarmed and their number is usually 22. The chromosome No. 11 of *D. melanostictus* exhibits a knob-like projection on the tip of the short arm. The biarmed karyotypes of 4 bufonid frog species are extremely conserved. All the genus *Bufo* species show a 6+ 5 karyotype pattern. However, the karyotype of *L. borbonica* demonstrates a 7+4 karyotype pattern. Thus, many species of the genus *Bufo* species are highly conservative at chromosomal level both standard karyotypes and chromosome morphologies. No heteromorphic pair of chromosomes has been identified in all bufonid frogs examined. Because sex chromosome differentiation in amphibians is still in early stage of differentiation. We consider that more useful information in detail can arise further after the conventional cytogenetic and molecular cytogenetic studies of a greater number of species of this genus in Thailand. The modern techniques in molecular cytogenetics can provide great contributions to higher level amphibian systematics, as well as for understanding cytological evolutionary mechanism.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are very greatful to Dr. Tanya Chan-Ard and Dr. Yodchai Chuengngern for their help in taxonomic amphibian identification. We would like to thank our colleagues who have particularly assisted us in Laboratory and field survey. We are indebted to Prof. Dr. Pongsak Rattanachaikunsopon for suggestions and comments during the preparation of the draft manuscript.

REFERENCES

Bogart JP. Chromosome number difference in the amphibian genus *Bufo* : The *Bufo regularis* species group. Evolution 1968; 22:42-45.

Bogart JP. Karyotype. In : Blair WF, editor. Evolution in the genus Bufo, Austin-London, University of Taxas Press. 1972; p.171-195.

Chan-Ard T, Grossmann W, Gumprecht A, Schulz KD. Amphibians and Reptiles of Peninsular Malaysia and Thailand (an illustrate checklist). Bushmaster Publication, Germany 1999.

Green DM, Sessions SL. Amphibian Cytogenetics and Evolution . San Diego-New York. Academic Press. 1991.

Khonsue W, Thirakhupt K. A checklist of the amphibians in Thailand. Nat. His. J Chulalongkorn Univ. 2001;1: 69-82.

King M. The evolution of heterochromatin in the amphibian genome. In : Green DM, Sessions SK, editors. Amphibian Cytogenetics and Evolution. San Diego-New York. Academic Press. 1991; p.359-391.

Kuramoto M. A list of chromosome numbers of anuran amphibians. Bull. Fukuoka Univ. Educ., 1990; 36:83-127.

Morescalchi A. Amphibia. In : Chiarelli AB, Capanna E, editors. Cytotaxonomyand vertebrate evolution. London-New York Academic Press. 1973 ; p. 233-348.

Nakasem N. Studies on the development and karyotypes of *Microhyla ornata*, *Rana limonocharis* and *Bufo melanostictus*. [M. Sc. Thesis in Zoology] Bangkok, Faculty of Graduate School, Chulalongkorn University (in Thai) 1975.

Phatinawin S. Karyotype of *Rana cancrivora*. 6th National Genetics Congress. Naria Hotel, Bangkok, Thailand (in Thai with abstract in English) 1988; 57.

Schmid M. Chromosome banding in Amphibian. I. Constitutive heterochromatin and nucleolus organizer regions in *Bufo* and *Hyla*. Chromosoma 1978; 66: 361-388.

Supaprom, T ., and V. Baimai. 2002. Mitotic karyotypes of eight species of microhylid frogs from Thailand (Anura:Microhylidae). Amphibia-Reptilia 23: 510-516.

Supaprom, T ., and V. Baimai. 2004. Mitotic karyotypes of ten species of Ranid frogs (Anura;Ranidae) from Thailand. Amphibia-Reptilia 25: 104-111

Supaprom, T ., and V. Baimai. 2005. Characterization of C-banded mitotic chromosomes for the four species of anuran amphibians from Thailand. Amphibia-Reptilia 26: 367-371.

Supaprom, T ., Baimai, V., and Chan-Ard, T. 2006. Mitotic karyotypes of four megophryid frogs (Anura:Megophryidae) from Thailand. Amphibia-Reptilia 27: 456-460.

Taylor EH. The Amphibians fauna of Thailand. Univ. of Kansas Sci. Bull. 43 : 1962;265-599.

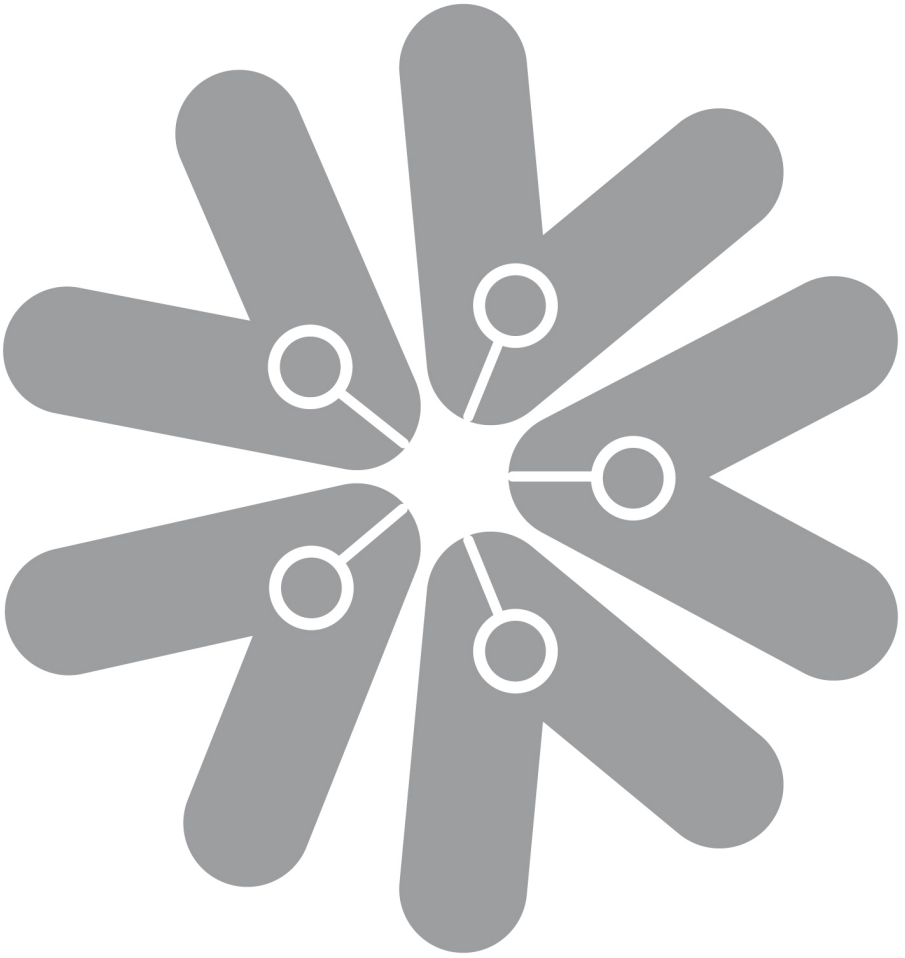
White MJD. The Chromosome. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1961.

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์

Subject: Architecture and Engineering

ภาคบรรยาย

Oral Presentation



การออกแบบใบพัดลมระบายความร้อนแบบไหลตามแนวแกนแบบสามใบพัดสำหรับเครื่องปรับอากาศโดยวิธีการออกแบบการทดลอง

Design of Axial-Flow Cooling 3-Fan in Air Conditioner Based on DOE Method

กิตติเชษฐ์ สุวรรณวัฒน์[1] พัชราภรณ์ ญาณภิรัต[2*] และ ศันสนีย์ สุภาภา[2]

Kittiched Suvannawat[1], Patcharaporn Yanpirat[2*] and Sansanee Supapa[2]

บทคัดย่อ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องปรับอากาศโดยมุ่งเน้นการปรับปรุงและพัฒนาชุดคอนเดนซิ่งให้มีขนาดเล็กลง เป็นแนวทางหนึ่งในการตอบสนองความต้องการของกลุ่มลูกค้าในการติดตั้งแต่มีพื้นที่ใช้สอยภายนอกอาคารจำกัด จากขนาดของชุดคอนเดนซิ่งที่เล็กลงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศไม่เป็นไปตามข้อกำหนดรายละเอียดผลิตภัณฑ์ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงการเพิ่มอัตราการระบายความร้อนอากาศของชุดคอนเดนซิ่งโดยการเปลี่ยนใบพัดลมจากเดิม 2 ใบพัด ไปเป็น 3 ใบพัด โดยการประยุกต์วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อประมาณค่าระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการไหลของอากาศ จากนั้นนำค่าปัจจัยที่ได้ไปสร้างใบพัดลมต้นแบบและทดสอบสมรรถะการทำงานโดยตัววัด คือ ค่าประสิทธิภาพการทำความเย็น ค่าการใช้พลังงาน และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น ผลการทดสอบพบว่า สมรรถะการทำงานของพัดลมแบบ 3 ใบพัด ดีกว่าแบบ 2 ใบพัด และมีประสิทธิภาพดีกว่าค่าที่กำหนดของรายละเอียดผลิตภัณฑ์

ABSTRACT

Product development of air conditioner by reducing dimension of condensing unit is considered as an alternative issue to fulfill the consumer requirement with limited outdoor space availability. The objective of this research is aimed at to modify the condensing unit of 13,000 BTU air conditioner for using in the 18,000 BTU air conditioner. Changing the number of fan blades from two to three blades are considered. The design of experiment by Central Composite Design method is employed to determine the factors effect to the airflow rate and their optimal levels for forming of the prototype fan blades. The results in terms of cooling capacity, power input, and coefficient of performance reveal the superior performance comparing to the two-blade fan.

Key Words: air conditioner, cooling fan, design of experiment, product development

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

[1]สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Graduate Program in Engineering Management, 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

อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องปรับอากาศในประเทศไทยปัจจุบันมีการแข่งขันทางการตลาดสูงมาก ซึ่งในการที่จะได้ส่วนแบ่งทางการตลาดในกลุ่มเครื่องปรับอากาศ จำเป็นจะต้องมีการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าในด้านต่างๆ เช่น ราคา รูปลักษณ์ คุณภาพ ประสิทธิภาพของตัวสินค้า และบริการหลังการขาย เป็นต้น เพื่อให้ลูกค้ามีความพึงพอใจและสนใจในตัวผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการสร้างความได้เปรียบในการแข่งขัน ทั้งนี้การตอบสนองความต้องการของลูกค้าโดยทั่วไปเริ่มจากการสำรวจความต้องการของตลาดหรือลูกค้าเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลในการวางแผนการตลาด และการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบใบพัดลมระบายความร้อนแบบไหลตามแนวแกนแบบสามใบพัดสำหรับเครื่องปรับอากาศจะดำเนินการโดยประยุกต์แนวคิดดังกล่าวกับกรณีศึกษาแห่งหนึ่งซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตเครื่องปรับอากาศสำหรับใช้ในอาคารทั่วไป จากนโยบายการสร้างกลยุทธ์การผลิตสินค้าที่มีความแตกต่างเพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันในขณะที่คุณภาพของสินค้าต้องไม่ด้อยไปกว่าเดิม ทำให้กรณีศึกษามีนโยบายการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 18,000 บีทียู ซึ่งเป็นรุ่นที่มียอดขายต่อปีในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้สูงที่สุด ให้มีขนาดของชุดคอนเดนซิ่งเล็กลงเท่ากับขนาดชุดคอนเดนซิ่งของเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 13,000 บีทียู เพื่อตอบสนองความต้องการของกลุ่มลูกค้าในการติดตั้งแต่มีพื้นที่ใช้สอยภายนอกอาคารจำกัด อย่างไรก็ดีพบว่า การปรับขนาดของชุดคอนเดนซิ่งให้เล็กลงแต่มีประสิทธิภาพการทำความเย็นเท่าเดิมหรือสูงขึ้นนั้น จำเป็นต้องมีการออกแบบและการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์หลักที่สำคัญให้มีขนาดและประสิทธิภาพเหมาะสมกับชุดคอนเดนซิ่งที่มีการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้กรณีศึกษาได้มีการปรับปรุงระบบคอมเพรสเซอร์ (Compressor) ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) และท่อลดความดัน (Capillary Tube) โดยอ้างอิงอุปกรณ์พื้นฐานอื่นๆ จากชุดคอนเดนซิ่งขนาด 13,000 บีทียู ซึ่งจากการปรับปรุงและพัฒนาข้างต้น ฝ่ายออกแบบประสบปัญหาค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นไม่ถึงตามเกณฑ์มาตรฐานที่ถูกออกแบบไว้ จากการวิเคราะห์หาสาเหตุจากทีมวิศวกรออกแบบของกรณีศึกษา พบว่า การปรับขนาดของชุดคอนเดนซิ่งซึ่งมีพัดลมระบายความร้อนแบบ 2 ใบพัด สำหรับเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 18,000 บีทียู ให้เล็กลงนั้น ส่งผลทำให้เกิดปัญหาอัตราการระบายความร้อนของชุดคอนเดนซิ่งไม่เหมาะสมกับขนาดของชุดคอนเดนซิ่ง และส่งผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of Performance - COP) (กฤษณะ และมนต์ศักดิ์, 2554) หรืออีกนัยหนึ่งคือ การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็นมีค่าอุณหภูมิสูงกว่าค่าที่ถูกออกแบบไว้ ดังนั้นการปรับปรุงการระบายความร้อนของพัดลมในชุดคอนเดนซิ่งซึ่งมีพัดลมระบายความร้อนแบบ 2 ใบพัด สำหรับเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 18,000 บีทียู จึงเป็นประเด็นสำคัญสำหรับงานวิจัยนี้

จากการทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบใบพัดลมแบบไหลตามแนวแกน (Axial-Flow Fan) พบว่า มี 3 ปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของอากาศหรือประสิทธิภาพการระบายความร้อนของพัดลม คือ 1) ปลายใบพัดลม (Fathololumi and Hassanabad, 2016; Gaggero *et al*., 2016; Huuva and Tornros, 2016; Zhao *et al*. (2013, 2016)) 2) ขอบใบพัดลมด้านนอก (Gaggero *et al*., 2016; Huuva and Tornros, 2016; Zhao *et al*. (2013, 2016)) และ 3) มุมฐานใบพัดลม (Huuva and Tornros, 2016; Ye *et al*., 2017) สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณพารามิเตอร์ Aksoy and Sagol (2016) และ Yao *et al*.

(2016) ประยุกต์วิธี Central Composite Design ในการศึกษาการลอยตัวของถ่านหิน ขณะที่วีรยุทธ (2557), Wang *et al*. (2014, 2016) และ Zhao *et al*. (2013, 2016) ประยุกต์หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ค่าอัตรการไหลของอากาศของระบบแอร์ภายนอก จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าการออกแบบใบพัดลมผู้ออกแบบนิยมใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) กับโปรแกรมการออกแบบ จากนั้นใช้การจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผล ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเวลาและขาดความน่าเชื่อถือทางสถิติ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงการระบายความร้อนของพัดลมแบบไหลตามแนวแกนสำหรับเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 18,000 บีทียู ซึ่งชุดคอนเดนซิ่งถูกปรับให้มีขนาดลดลงเท่ากับขนาดชุดคอนเดนซิ่งของเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 13,000 บีทียู โดยการเพิ่มใบพัดลมของจากเดิม 2 ใบพัด ไปเป็นแบบ 3 ใบพัด และใช้หลักการทางสถิติช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการออกแบบใบพัดลม โดยคาดว่าจะสามารถเพิ่มอัตราการระบายความร้อนของอากาศและเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งการวิจัยนี้เป็นลักษณะของงานวิจัยต้นแบบเพื่อการพัฒนาการผลิตหรือเฟสแรกของการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมเพื่อนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย 1) โปรแกรม Solid Works Version 2016 โปรแกรม Autodesk CFD Version 2017 2) โปรแกรม MINITAB Version 2017 3) เครื่องพิมพ์สามมิติ (3D Printer) รองรับขนาดชิ้นงาน กว้าง 405 มิลลิเมตร ยาว 405 เซ็นติเมตร สูง 305 เซ็นติเมตร 4) เม็ดพลาสติก ABS ผสมกราไฟท์ 30 เปอร์เซ็นต์ สำหรับใช้ในการสร้างชิ้นงานต้นแบบ 5) เครื่อง Chamber สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศขนาด 3 - 55 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และ 6) ห้องทดสอบประสิทธิภาพในการทำความเย็นขนาดการทำความเย็น 2,800 ถึง 16,000 วัตต์

วิธีการประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ 1) การออกแบบแผนการทดลอง 2) การคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล โดยใช้ค่าระดับของปัจจัยจากแผนการทดลอง 3) การวิเคราะห์ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่ออัตราการไหลของอากาศ และ 4) การทดสอบหาค่าอัตราการไหลของใบพัดลมและค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

การออกแบบแผนการทดลอง

เนื่องจากขนาดของชุดคอนเดนซิ่งสำหรับเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 18,000 บีทียู ถูกปรับให้มีขนาดลดลงเท่ากับขนาดชุดคอนเดนซิ่งสำหรับเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 13,000 บีทียู ดังนั้นตัวแปรที่ถูกควบคุมในงานวิจัยนี้ได้แก่ 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดลมเท่ากับ 375 มิลลิเมตร 2) ความเร็วรอบของใบพัดลมเท่ากับ 730 รอบต่อนาที และ 3) ปริมาตรก้อนอากาศสำหรับจำลองสภาวะการหมุนของใบพัดลมเท่ากับ 200 x 595 x 560 ลูกบาศก์มิลลิเมตร การออกแบบแผนการทดลองในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Central Composite Design (CCD) เพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อการอัตราการไหลของอากาศ (Air flow rate) ของใบพัดลมหรือค่าตัวแปรตอบสนอง โดยจากการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อใบพัดลมเพื่อนำมาศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ปลายใบพัดลม (Tip blade) ขอบใบพัดลมด้านนอก (Leading edge blade) และมุมฐานใบพัด

ลม (Angle root blade) ระดับของทั้ง 3 ปัจจัยมีค่าสูงสุดและต่ำสุดดังแสดงใน Table 1 ซึ่งจะถูกนำไปสร้างแผนการทดลองด้วยโปรแกรม MINITAB และใช้เป็นปัจจัยนำเข้าเพื่อออกแบบใบพัดลม

Table 1 Propeller factors and their levels.

Factor	Unit	Levels	
		High	Low
Tip Blade (A)	mm.	12	8
Leading Edge (B)	mm.	259	247
Angle Root Blade (C)	mm.	220	180

การคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล

จากแผนการทดลองที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม MINITAB ซึ่งกำหนดค่าของแต่ละปัจจัยในแต่ละชุดของการทดลองจะถูกกำหนดเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการออกแบบเพื่อสร้างใบพัดลมด้วยโปรแกรม Solidworks หลังจากนั้นนำใบพัดลมแบบ 3 ใบพัดที่ได้รับการออกแบบไปจำลองสถานการณ์การทำงานของใบพัดลม (Simulation) เพื่อวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลสำหรับหาค่าความเร็วลมของใบพัด ด้วยโปรแกรม Autodesk CFD โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกร์ มีรายละเอียดขั้นตอนการจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน (Wang *et al*. (2014, 2016) คือ 1) กำหนดตัวแปรที่เกี่ยวกับโครงสร้างก่อนที่จะคำนวณตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2) สร้างรูปทรงเรขาคณิต รูปทรงของใบพัดลมถูกสร้างขึ้นมาเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ 3) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ กำหนดวัสดุของใบพัดลมที่ถูกนำมาวิเคราะห์ 4) กำหนดเอลิเมนต์และโครงตาข่าย เป็นการกำหนดให้เป็นไปตามรูปทรงเรขาคณิต 5) กำหนดเงื่อนไขขอบเขต เป็นการกำหนดขอบเขตรูปแบบในการวิเคราะห์ก้อนของของไหล และ 6) วิเคราะห์และแสดงผลการวิเคราะห์ แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบต่างๆ หลังจากได้ค่าความเร็วของใบพัดลมจากโปรแกรม Autodesk CFD แล้วนำไปคำนวณหาค่าอัตราการไหลของอากาศที่ใบพัดลมในแต่ละการทดลอง (วีรยุทธ, 2557) ดังสมการที่ (1)

$$Q = AV \tag{1}$$

เมื่อกำหนดให้ Q คือ อัตราการไหลของอากาศ (หน่วย: ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) A คือ พื้นที่หน้าตัด (หน่วย: ตารางเมตร) และ V คือ ความเร็วของอากาศ (หน่วย: ตารางเมตรต่อวินาที)

การวิเคราะห์ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่ออัตราการไหลของอากาศ

หลังจากได้ค่าอัตราการไหลของอากาศจากการคำนวณด้วยสมการที่ (1) สำหรับแต่ละชุดการทดลอง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการไหลของอากาศ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ $\alpha = 0.1$ จากปัจจัยที่มีผลอิทธิพลต่ออัตราการไหลของอากาศ นำไปวิเคราะห์หาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้อัตราการไหลของอากาศมีอัตราสูงสุด โดยวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม MINITAB จากนั้นนำไปวิเคราะห์ซ้ำอีกครั้งหนึ่งด้วยโปรแกรม Autodesk CFD เพื่อยืนยันผลระหว่างค่าอัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการประมวลผลด้วย Response Optimizer กับค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Autodesk CFD

เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ใบพัดลมมีอัตราการไหลสูงสุดจากนั้นนำไปสร้างใบพัดลมต้นแบบโดยใช้วัสดุเม็ดพลาสติก ABS ผสมกราไฟท์ 30 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

การทดสอบหาค่าอัตราการไหลของใบพัดลมและค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ

จากนั้นนำใบพัดลมต้นแบบไปทดสอบหาค่าอัตราการไหลเปรียบเทียบระหว่างใบพัดลมแบบ 2 ใบพัดกับใบพัดลมต้นแบบหรือแบบ 3 ใบพัด โดยนำใบพัดลมทั้ง 2 แบบไปติดตั้งกับชุดคอนเดนซิ่งและทดสอบด้วยเครื่อง Chamber หลังจากนั้นนำใบพัดลมทั้ง 2 แบบ ที่ถูกติดตั้งในชุดคอนเดนซิ่งไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of Performance - COP) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความเย็นระหว่างพัดลมทั้ง 2 แบบ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การออกแบบแผนการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design (CCD) และวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ใบพัดลมมีค่าอัตราการไหลของอากาศมากที่สุด โดยในงานวิจัยได้ทำการทดลองซ้ำเพียง 1 ครั้ง เนื่องจากในการทดลองด้วยโปรแกรม Autodesk CFD เป็นการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ที่ไม่มีตัวรบกวนในระบบ (No noise) จึงทำให้การทดลองซ้ำไม่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองนั้นเปลี่ยนไป จากการออกแบบแผนการทดลองด้วยวิธี CCD ทำให้มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง แผนการทดลองแต่ละชุดสำหรับแต่ละระดับของปัจจัยสำหรับปลายใบพัดลม (Tip blade) ขอบใบพัดลมด้านนอก(Leading edge blade) และมุมฐานใบพัดลม (Angle root blade) มีรายละเอียดดังแสดงในสดมภ์ที่ 3 - 5 ของ Table 2 และค่าอัตราการไหลของอากาศ (Air flow) ซึ่งเป็นตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการนำค่าปัจจัยทั้งสามของแต่ละชุดการทดลองไปสร้างใบพัดลมแบบ 3 ใบพัด ด้วยโปรแกรม Solidworks และวิเคราะห์หาค่าความเร็วลมของพัดลมด้วยโปรแกรม Autodesk มีรายละเอียดแสดงดังสดมภ์ที่ 8 ของ Table 2 เพื่อนำไปวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการไหล (Air Flow) ของใบพัดลมแบบ 3 ใบพัด โดยขั้นแรกพิจารณาความเหมาะสมของข้อมูลจากกราฟ ดังแสดงใน Figure 1 เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลของอากาศ จาก Figure 1 พบว่า ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ และค่าผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีความแปรปรวนคงที่ และค่าผิดพลาดเป็นอิศระต่อกัน และจากกราฟ Normal Probability การกระจายตัวของชุดข้อมูลอยู่รอบๆ ค่าศูนย์ จึงทำให้สรุปได้ว่า ค่าความผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีความแปรปรวนคงที่ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Figure 2) สำหรับผลกระทบหลัก (Main effect) และผลกระทบร่วม (Interaction effect) ของปัจจัยทั้งสาม คือ ปลายใบพัดลม (Tip blade) ขอบใบพัดลมด้านนอก (Leading edge blade) และมุมฐานใบพัดลม (Angle root blade) ที่มีต่อตัวแปรตอบสนองคือ อัตราการไหลของอากาศ (Air flow) ณ ระดับนัยสำคัญของการทดสอบสมมติฐานที่ $\alpha = 0.1$ พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยปลายใบพัดลมกับปัจจัยมุมฐานใบพัดลม มีอิทธิพลต่ออัตราการไหลของอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.1 > P\text{-}value = 0.027$) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยมุมฐานใบพัดลมกับปัจจัยขอบใบพัดลมด้านนอก มีอิทธิพลต่ออัตราการไหลของอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.1 > P\text{-}value = 0.070$) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลต่ออัตราการไหลของอากาศ ผลการวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยปลายใบพัดลม (Tip blade) ปัจจัยขอบใบพัดลมด้านนอก (Leading edge blade) และปัจจัยมุมฐานใบพัดลม (Angle root blade) ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม

MINITAB ที่ทำให้อัตราการไหลมีค่าสูงสุด มีรายละเอียดดังแสดงใน Figure 3 กล่าวคือ ปลายใบพัดลมเท่ากับ 7 มิลลิเมตร ขอบใบพัดลมด้านนอกเท่ากับ 263 มิลลิเมตร และมุมฐานใบพัดลมเท่ากับ 234 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้อัตราการไหลของอากาศมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.7882 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

Table 2 The Experimental Method by CCD

Run order	Standard order	Tip blade	Leading edge	Angle root blade	Air flow
1	20	10	253	200	4.96
2	7	8	259	220	5.49
3	15	10	253	200	4.96
4	8	12	259	220	5.00
5	4	12	247	220	4.79
6	6	12	259	180	4.87
7	13	10	243	200	4.91
8	10	13	253	200	4.75
9	12	10	253	234	5.02
10	16	10	253	200	4.96
11	3	8	247	220	4.99
12	2	12	247	180	4.73
13	9	7	253	200	5.07
14	1	8	247	180	4.78
15	18	10	253	200	4.96
16	19	10	253	200	4.96
17	14	10	263	200	4.91
18	17	10	253	200	4.96
19	5	8	259	180	4.74
20	11	10	253	166	4.93

จากค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับ 3 ปัจจัยข้างต้น นำไปออกแบบและขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยเครื่อง 3D Printer สำหรับใบพัดลมแบบ 3 ใบพัด ดังแสดงใน Figure 4 จากนั้นนำพัดลมแบบเดิมหรือแบบ 2 ใบพัดที่มีปลายใบพัดลมเท่ากับ 7 มิลลิเมตร ขอบใบพัดลมด้านนอกเท่ากับ 257 มิลลิเมตร และมุมฐานใบพัดลมเท่ากับ 200 มิลลิเมตร กับใบพัดลมแบบ 3 ใบพัดที่ถูกออกแบบใหม่ นำไปติดตั้งในชุดคอนเดนซิ่งที่ถูกปรับขนาดให้เล็กลง เพื่อทดสอบเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจากการนำไปใช้จริงด้วยเครื่อง Chamber ซึ่งค่าอัตราการไหลที่เกิดขึ้นคือ ค่าที่วัดได้จากใบพัดลมแบบ 2 ใบพัด เท่ากับ 25.05 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และค่าที่วัดได้จากใบพัดลมแบบ 3 ใบพัด เท่ากับ 35.04 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ซึ่งเพิ่มขึ้น 9.99 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที คิด

เป็น 139.40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแบบ 2 ใบพัด และนำใบพัดลมทั้ง 2 แบบ ที่ถูกติดตั้งในชุดคอนเดนซิ่งนำไปทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ โดยรายละเอียดผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศดังแสดงใน Table 3

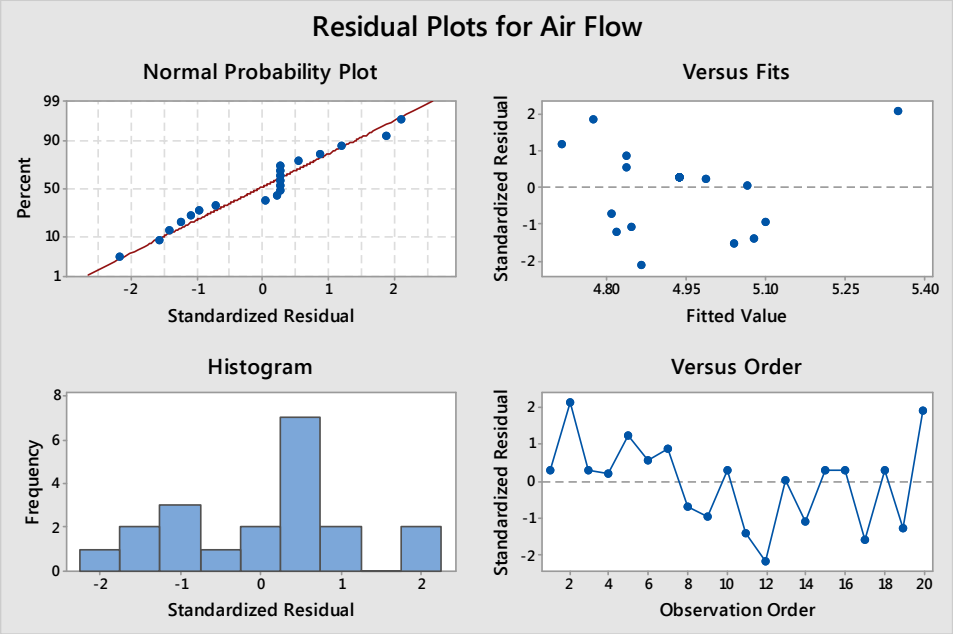


Figure 1 Residual Plot for Air Flow (Y)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.403224	0.044803	4.08	0.019
Linear	3	0.271684	0.090561	8.26	0.005
Tip	1	0.094025	0.094025	8.57	0.015
Root Blade	1	0.127733	0.127733	11.65	0.007
Leading Edge	1	0.049926	0.049926	4.55	0.059
Square	3	0.011806	0.003935	0.36	0.784
Tip*Tip	1	0.006054	0.006054	0.55	0.475
Root Blade*Root Blade	1	0.000102	0.000102	0.01	0.925
Leading Edge*Leading Edge	1	0.006265	0.006265	0.57	0.467
2-Way Interaction	3	0.119734	0.039911	3.64	0.052
Tip*Root Blade	1	0.073153	0.073153	6.67	0.027
Tip*Leading Edge	1	0.001431	0.001431	0.13	0.725
Root Blade*Leading Edge	1	0.045150	0.045150	4.12	0.070
Error	10	0.109687	0.010969		
Lack-of-Fit	5	0.109687	0.021937	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.512911			

Figure 2 Analysis of Variance: Air Flow versus Tip, Root Blade, Leading Edge

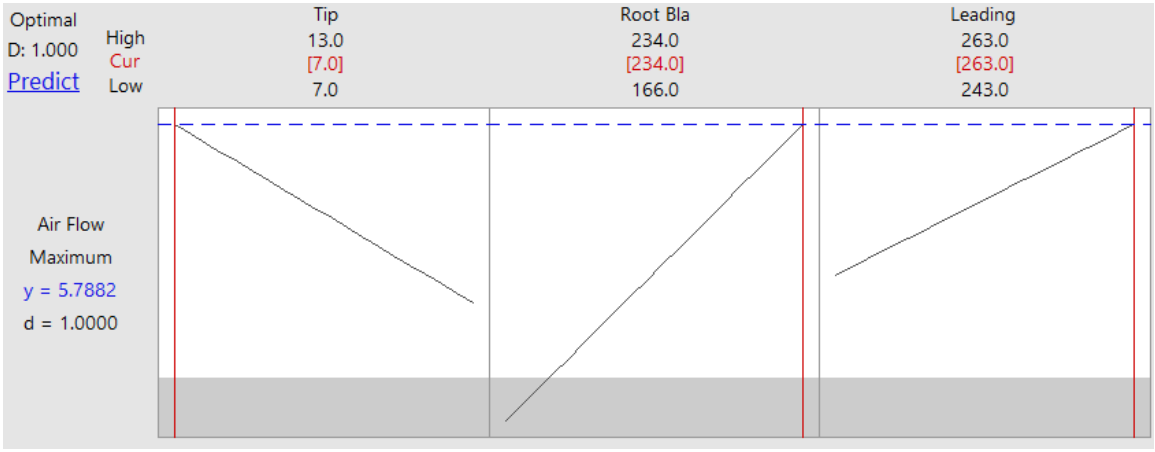


Figure 3 Optimization Plot

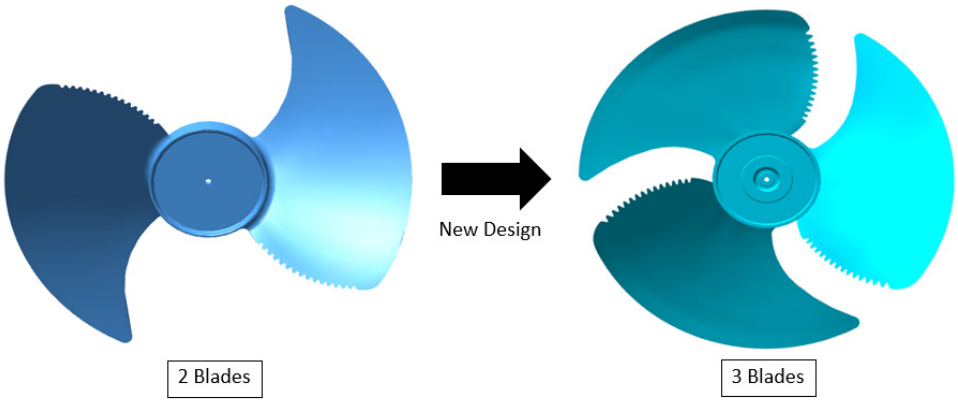


Figure 4 New Design Propeller 3 Blades From 2 Blades

Table 3 Performance Result of Air Conditioners

Description	Specification	2 Blade		3 Blade	
		Test Result	Compare (%)	Test Result	Compare (%)
Cooling Capacity (W)	5,400 W	5,041 W	93.35%	5,595 W	103.61%
Power Input (W)	1,460 W	1,367 W	93.63%	1,330 W	91.10%
Coefficient of Performance (W/W)	3.70	3.69	99.73%	4.20	113.51%

พบว่าชุดคอนเดนซิ่ง แบบใบพัดลม 2 ใบพัด มีค่าขีดความสามารถการทำความเย็นสุทธิ (Cooling capacity) และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of performance, COP) ต่ำกว่าค่าที่กำหนดของรายละเอียดผลิตภัณฑ์ (Specification) ขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (Power input) น้อยกว่าค่าที่กำหนดของรายละเอียดผลิตภัณฑ์ แต่เมื่อมีการปรับปรุงจำนวนใบพัดลมจากเดิม 2 ใบพัด ไปเป็นแบบ 3 ใบพัด พบว่า มีค่าขีดความสามารถการทำความเย็นสุทธิ (Cooling capacity) เท่ากับ 5,595 วัตต์ หรือร้อยละ 103.61

เมื่อเทียบกับค่าที่กำหนดของรายละเอียดผลิตภัณฑ์ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (Power input) เท่ากับ 1,330 วัตต์ หรือร้อยละ 91.10 และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of performance, COP) เท่ากับ 4.20 หรือร้อยละ 113.51 หรือนัยหนึ่งตัววัดสมรรถนะการทำงานทุกตัววัดมีค่าสูงหรือดีกว่าค่าที่กำหนดของรายละเอียดผลิตภัณฑ์ (Specification) และเมื่อเปรียบเทียบกับตัววัดสมรรถนะการทำงานของกรณีแบบ 2 ใบพัด พบว่า ทุกตัววัดของแบบ 3 ใบพัด มีค่าดีหรือสูงกว่าสมรรถนะการทำงานของพัดลมแบบ 2 ใบพัด ซึ่งมีค่าขีดความสามารถการทำความเย็นสุทธิ (Cooling capacity) เท่ากับ 5,041 วัตต์ หรือร้อยละ 93.35 เมื่อเทียบกับค่าที่กำหนดของรายละเอียดผลิตภัณฑ์ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (Power input) เท่ากับ 1,367 วัตต์ หรือร้อยละ 93.63 และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of performance, COP) เท่ากับ 3.69 หรือร้อยละ 99.73

สรุป

การออกแบบใบพัดลมระบายความร้อนแบบไหลตามแนวแกนแบบ 3 ใบพัด สำหรับเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 18,000 บีทียู ซึ่งชุดคอนเดนซิ่งถูกปรับขนาดขนาดลดลงเท่ากับขนาดของชุดคอนเดนซิ่งสำหรับเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 13,000 บีทียู โดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนใบพัดจากเดิม 2 ใบพัด ไปเป็น 3 ใบพัด พบว่า ในการออกแบบใบพัดลมเพื่อให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนได้เป็นไปตามหรือดีกว่าข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ ขนาดของปลายใบพัดลม เท่ากับ 7 มิลลิเมตร ขอบใบพัดลมด้านนอกเท่ากับ 263 มิลลิเมตร และ มุมฐานใบพัดลม เท่ากับ 234 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ได้ค่าอัตราการไหลที่สูงสุดเท่ากับ 5.7882 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที จากผลการทดสอบพัดลมแบบ 3 ใบพัดในห้องปฏิบัติการ พบว่า มีค่าขีดความสามารถการทำความเย็นสุทธิ (Cooling capacity) ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (Power input) และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of performance, COP) ดีกว่าค่าที่กำหนดของรายละเอียดผลิตภัณฑ์ ซึ่งยืนยันว่าการปรับปรุงการระบายความร้อนสำหรับชุดคอนเดนซิ่งที่มีการลดขนาดลงสำหรับเครื่องปรับอากาศขนาดการทำความเย็น 18,000 บีทียู โดยการเพิ่มจำนวนใบพัดลมจากเดิม 2 ใบพัด ไปเป็น 3 ใบพัด จะมีการใช้พลังงานลดลง ขณะที่มีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กฤษณะ ธรรมิกานนท์ และ มนต์ศักดิ์ พิมสาร. 2554. **การวิเคราะห์อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน**. คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วีรยุทธ หล้าอมรชัยสกุล. 2557. การคำนวณพลศาสตร์ของไหล. **วิศวสารลาดกระบัง** ปีที่ 31 (4): 1-6.

Aksoy, D. and E. Sagol. 2016 . Application of central composite design method to coal flotation: Modelling, optimization and verification. **Fuel** 183: 609-616.

Fathololumi, S and M. Hassanabad. 2016. A New Perspective on Structural, Materials, and Simulation of Flow and Cavitation around the Propeller with Energy Saving System. **Journal of Crystal Growth** 455: 117-121.

Gaggero, S., J. Gonzalez-Adalid and M. Sobrino. 2016. Design and analysis of a new generation of CLT propeller. **Applied Ocean Research** 59: 424-450.

Huuva, T. and S, Tomros. 2016. Computational fluid dynamics simulation of cavitating open propeller and azimuth thruster with nozzle in open water. **Ocean Engineering** 120: 160–164.

Wang, H., J. Tian., H. Ouyang., Y. Wu and Z. Du. 2014. Aerodynamic performance improvement of up flow outdoor unit of air conditioner by redesigning the bell-mouth profile. **International journal of refrigeration** 46: 173-184.

Wang, L., A. Kolios., T. Nishino., P. Delafin and T. Bird. 2016. Structural optimisation of vertical-axis wind turbine composite blades based on finite element analysis and genetic algorithm. **Composite Structures** 153: 123–138.

Yao, J., Y. Zhang., Q. Hu., D. Zeng., F. Hua., W. Meng., W. Wang and G. Bao. 2017. Optimization of paeonol-loaded poly (butyl-2-cyanoacrylate) nanocapsules by central composite design with response surface methodology together with the antibacterial properties. **European Journal of Pharmaceutical Sciences** 101: 189-199.

Ye, X., X. Ding., J. Zhang and C. Li. 2017. Numerical simulation of pressure pulsation and transient flow field in an axial flow fan. **Energy** 129: 185-200.

Zhao, X., J. Sun and Z. Zhang. 2013. Prediction and measurement of axial flow fan aerodynamic and aeroacoustic performance in a split-type air-conditioner outdoor unit. **International Journal of Refrigeration** 36: 1098-1108.

Zhao, C., J. Han., X. Yang., J. Qian and B. Fan. 2016. A review of computational fluid dynamics for forced-air cooling process. **Applied Energy** 168: 314-331.

การศึกษาประสิทธิภาพของตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาเพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

The Efficiency of Water Supply Sludge for Carbon Dioxide Gas Removal

นิศารัตน์ ใจยศเส้า[1] พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ[1] และ สุชีลา พลเรือง[1*]

Nisarat Jaiyossao[1], Peerakarn Banjerdkij[1] and Sucheela Polruang[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตะกอนประปา ซึ่งจะแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ วัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการอบให้ความร้อน (S) วัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วล้างออกด้วยน้ำ จากนั้นนำไปอบให้ความร้อน (SAW) และวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แต่ไม่ล้างออกแล้วนำไปอบให้ความร้อน (SANW) ผลจากการศึกษาแบบแบตช์พบว่าวัสดุดูดซับ SANW ขนาด 2.36-3.34 mm มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30,000 ppm และในการทดสอบจุดเบรคทรูจ์พบว่าวัสดุดูดซับ SANW มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมจนถึงจุดหมดสภาพ (C/C_0 = 1) สูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับอื่นในการศึกษานี้ โดยมีค่า C/C_0 เท่ากับ 4.40 mg/g นอกจากนี้พบว่าการฟื้นสภาพของวัสดุดูดซับด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมจนถึงจุดหมดสภาพ (C/C_0 = 1) ได้ 2.64 mg/g

ABSTRACT

CO_2 adsorption efficiency of water supply sludge was studied. In this study, water supply sludge was divided into 3 groups and named as S, SAW and SANW, respectively. In the first group water supply sludge was only oven-dried (S). In the second group it was firstly soaked in NaOH solution, then washed with water and oven-dried (SAW). The third group was water supply sludge, which was also soaked in NaOH solution and then directly oven-dried (SANW). Results from batch experiments indicated that SANW with the particle size of 2.36-3.34 mm had the highest CO_2 adsorption efficiency at CO_2 concentration of 30,000 ppm. The breakthrough test showed that SANW had the highest maximum adsorption capacity amongst those 3, which was 4.40 mg/g. The regeneration of exhausted SANW with NaOH solution was the most effective regeneration method with the highest maximum adsorption capacity of 2.64 mg/g.

Key Words: CO_2 adsorption, water supply sludge, alternative adsorbent, waste utilization

[*]Corresponding author; e-mail address: fengslpo@ku.ac.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ10900

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปัจจุบันภาคพลังงานและกระบวนการอุตสาหกรรมมีอัตราการเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ในช่วง พ.ศ.2554-2558 ประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 242.07 ton/yr ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 3.21% ต่อปี ในภาคการใช้พลังงาน (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560) โดยภาคเศรษฐกิจหลักที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ภาคการผลิตไฟฟ้า ภาคขนส่ง และภาคอุตสาหกรรม จากสถิติของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานพบว่า ในช่วง 6 เดือนแรกของปี พ.ศ.2559 ภาคการผลิตไฟฟ้ามีสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด คือ 38% โดยมีก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคการผลิตไฟฟ้ามากที่สุด คิดเป็นสัดส่วน 63% หรือมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 30.5 Mton โดยคิดเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้น 7% เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปีพ.ศ. 2558 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2559)

จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มอุณหภูมิของโลก จนเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศหรือภาวะโลกร้อน รวมถึงเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องหาวิธีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation) การดูดซึมด้วยสารละลาย (Absorption with a solvent) และการดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure swing adsorption) ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูงและสิ้นเปลืองพลังงานมาก วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างแพร่หลายคือการดูดซับ เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ใช้พลังงานน้อย เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำและมีประสิทธิภาพสูง สำหรับวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับมีหลายชนิดเช่น ถ่านกัมมันต์ ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ และดินเหนียวประเภทต่าง ๆ เป็นต้น

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตะกอนประปา ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตน้ำประปา เพื่อเป็นการใช้วัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทั้งยังเป็นการลดปริมาณของเสีย ในการศึกษานี้ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของตะกอนประปาด้วยความร้อนและสารเคมี โดยได้ทำการทดลองแบบแบตช์เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตะกอนประปาที่ผ่านการปรับปรุงแต่ละชนิด และทำการทดลองแบบต่อเนื่องเพื่อศึกษาลักษณะการดูดซับด้วยกราฟเบรคทรูจ์ (Breakthrough) ศึกษาจุดหมดสภาพ (Exhaustion point) และศึกษาการฟื้นสภาพของวัสดุดูดซับ (Regeneration) ผลของการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน รวมถึงเป็นการเพิ่มทางเลือกในการพัฒนาวัสดุดูดซับเพื่อประยุกต์ใช้ในงานสิ่งแวดล้อมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมวัสดุดูดซับ

ในการศึกษานี้ได้นำตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่หนึ่งคือ ตะกอนประปาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการอบให้ความร้อน เตรียมโดยการนำตะกอนประปาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 hr เรียกวัสดุดูดซับนี้ว่า “S” ชนิดที่สองคือตะกอนประปาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วล้างออกด้วยน้ำ

จากนั้นนำไปอบให้ความร้อน เรียกวัสดุดูดซับนี้ว่า “SAW” และชนิดที่สามคือตะกอนประปาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ไม่ล้างออกแล้วนำไปอบให้ความร้อน เรียกวัสดุดูดซับนี้ว่า “SANW” สำหรับวัสดุดูดซับชนิดที่สองและสาม เตรียมโดยนำตะกอนประปาที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 hr จากนั้นนำมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 M โดยกำหนดให้อัตราส่วนของตะกอนประปาต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 g : 1 ml แช่เป็นเวลา 24 hr แล้วแบ่งตะกอนประปาเป็นสองส่วน ส่วนแรกนำมาล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกด้วยน้ำประปาให้มีค่า pH เท่ากับ 7-8 (วัสดุดูดซับ “SAW”) ในขณะที่ส่วนที่สองไม่ล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ออก (วัสดุดูดซับ “SANW”) จากนั้นนำตะกอนประปาทั้งสองส่วนดังกล่าว (วัสดุดูดซับ SAW และ SANW) มาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 hr หลังจากผ่านการอบวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด จะมีลักษณะเป็นแผ่นและก้อนดินแข็งคล้ายดินเหนียวแห้ง ในการนำมาทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับจึงได้ทำการบดวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยแบ่งขนาดวัสดุดูดซับเป็น 2 กลุ่ม คือ ขนาด 2-2.35 mm และ 2.36-3.34 mm ซึ่งวัสดุดูดซับขนาด 2-2.35 mm เตรียมโดยการบดแล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และ 10 มีขนาด 2.36 mm และ 2.00 mm ตามลำดับ ซึ่งจะคัดเลือกเฉพาะตะกอนประปาที่ผ่านตะแกรงขนาด 2.36 mm แต่ไม่ผ่านตะแกรงขนาด 2.00 mm ส่วนวัสดุดูดซับขนาด 2.36-3.34 mm มีวิธีการเตรียมคล้ายกับการเตรียมวัสดุดูดซับ ขนาด 2-2.35 mm ต่างกันคือนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 6 และ 8 มีขนาด 3.35 mm และ 2.36 mm ตามลำดับ โดยวัสดุดูดซับที่เตรียมได้จะถูกนำไปเก็บใส่ถุงซิปล็อคและเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น (desiccator) เพื่อใช้ทำการทดลองต่อไป

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุดูดซับในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุดูดซับเป็นการทดลองแบบแบตช์ โดยทำการศึกษาชนิดและขนาดของวัสดุดูดซับ รวมทั้งความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดซับต่อไป ในการเตรียมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ทดสอบเตรียมจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 300,000 ppm แล้วเจือจางด้วยอากาศจนได้ความเข้มข้นที่ต้องการ ทุกการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง การวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำโดยใช้เข็มเก็บตัวอย่างก๊าซใส่หลอดเก็บก๊าซปริมาตร 6 ml แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ (Gas Chromatograph: GC 6890, TCD detector) คอลัมน์ที่ใช้วิเคราะห์ชนิด polar pack q และตั้งค่าอื่น ๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งานของเครื่อง เช่น อัตราการไหลของก๊าซเข้าเครื่องตรวจวัด 48 ml/min อุณหภูมิในเครื่องตรวจวัด 150 °C เป็นต้น

2.1 การศึกษาชนิดของวัสดุดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ทำโดยนำวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด คือ S, SAW และ SANW ปริมาณ 1 g ขนาดของวัสดุดูดซับ 2.36-3.34 mm ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองคือ 30,000 ppm ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 65 ml เก็บตัวอย่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทุก 0,1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 min ตามลำดับ แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ GC 6890 และบันทึกผลการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์

2.2 การศึกษาขนาดของวัสดุดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ทำโดยนำวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดจากการทดลองข้อ 2.1 มาทำการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 30,000 ppm โดยขนาดของวัสดุดูดซับที่ใช้ใน

การทดลองส่วนนี้แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ 2-2.35 mm และ 2.36-3.34 mm ตามลำดับ ทำการทดสอบที่ปริมาณวัสดุดูดซับ 1, 5, 10 และ 20 g ระยะเวลาในการดูดซับ 60 min การทดลองนี้ทำในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 65 ml แล้วเก็บตัวอย่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง (นาทีที่ 0 และ 60 ตามลำดับ) แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ GC 6890 และบันทึกผลการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์

2.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ

ทำการศึกษาการดูดซับที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ คือ 30,000 ppm, 50,000 ppm, 150,000 ppm และ 300,000 ppm โดยนำวัสดุดูดซับที่ชนิดและขนาดที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองข้อ 2.1 และ 2.2 ปริมาณ 1 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 65 ml แล้วนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซทุก 10 min เป็นเวลา 60 min แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ GC 6890 และบันทึกผลการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์

3. การศึกษาจุดเบรคทรูจ์ (Breakthrough) และจุดหมดสภาพ (Exhaustion point) ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Breakthrough curve)

การทดลองหากราฟเบรคทรูจ์และจุดหมดสภาพในส่วนนี้จะทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยนำวัสดุดูดซับชนิดและขนาดที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองข้อ 2.1 และ 2.2 ปริมาณ 200 g บรรจุใส่คอลัมน์ดูดซับก๊าซ ซึ่งเป็นท่อ PVC ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 cm สูง 20 cm มีปริมาตรบรรจุประมาณ 393 cm^3 ซึ่งจะใช้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30,000 ppm เตรียมได้จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 300,000 ppm ที่อัตราการไหล 55 ml/min เจือจางด้วยอากาศที่อัตราการไหล 500 ml/min แล้วปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่คอลัมน์ดูดซับแบบต่อเนื่องและเก็บตัวอย่างก๊าซที่ด้านขาเข้าและขาออกจากคอลัมน์ดูดซับทุก ๆ 1 min เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ GC 6890 จนกระทั่งค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านขาเข้ามีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านขาออก ทำการทดลองดังที่กล่าวมาทั้งหมด 3 ซ้ำ และบันทึกผลการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์

4. การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับหลังฟื้นสภาพ

การทดลองส่วนนี้จะนำวัสดุดูดซับที่ผ่านการทดสอบการดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพแล้วจากการทดลองในข้อ 3. มาฟื้นสภาพ และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งวิธีการฟื้นสภาพวัสดุดูดซับมี 3 วิธี คือ วิธีที่หนึ่งการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NAOH) เตรียมโดยการนำวัสดุดูดซับมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 M กำหนดให้อัตราส่วนของตะกอนประปาต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 g : 1 ml เป็นเวลา 24 hr จากนั้นนำมาแยกน้ำส่วนบนออกแล้วนำวัสดุดังกล่าวไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 hr แล้วนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้น จากนั้นนำไปขึ้นรูปให้มีขนาด 2.36-3.34 mm และนำไปเก็บใส่ถุงซิปล็อคเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น เพื่อใช้ทำการทดลองในขั้นต่อไป วิธีที่สองเป็นการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน (T) เตรียมโดยการนำวัสดุดูดซับไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 hr จากนั้นนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้นและเก็บใส่ถุงซิปล็อคเพื่อใช้ทำการทดลองในขั้นต่อไป วิธีที่สามเป็นการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนและปั๊มสุญญากาศ (TVP) เตรียมโดยการนำวัสดุดูดซับไปอบในตู้อบ

ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 hr นำไปเก็บในตู้ดูดความชื้น จากนั้นนำไปดูดก๊าซที่สะสมอยู่ในวัสดุดูดซับออกด้วยปั๊มสุญญากาศ เป็นเวลา 30 min เก็บใส่ถุงซิปล็อคแล้วเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น เพื่อใช้ทำการทดลองในขั้นต่อไป การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำโดยนำวัสดุดูดซับที่ผ่านการฟื้นสภาพด้วยวิธีต่าง ๆ ดังที่กล่าวมา ทำการทดลองหากราฟเบรคทรูจ์และจุดหมดสภาพตามการทดลองข้อ 3. การทดลองนี้ทำจนถึงจุดหมดสภาพของวัสดุดูดซับคือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านขาเข้ามีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้านขาออก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาชนิดวัสดุดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (การทดลองแบบแบตช์)

จากการศึกษาชนิดของวัสดุดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับ S, SAW และ SANW โดยการทดลองแบบแบตช์ในขวดรูปชมพู่ พบว่าที่ระยะเวลาในการดูดซับสูงสุด 60 min ทุกระบบเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยวัสดุดูดซับ SANW สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากที่สุด รองลงมาคือ SAW และ S มีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 100, 86 และ 85% ตามลำดับ ดังนั้นวัสดุดูดซับ SANW มีคุณสมบัติในการนำไปใช้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Andres *et al*. (2013) พบว่าวัสดุดูดซับที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถเพิ่มปริมาณรูพรุนและเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายเบสที่สามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี (เรวดี และคณะ, 2558)

ผลการทดลองขนาดวัสดุดูดซับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (การทดลองแบบแบตช์)

จากผลการทดลองในหัวข้อข้างต้น พบว่าวัสดุดูดซับ SANW เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด ในการทดลองนี้จึงได้นำวัสดุดูดซับ SANW มาใช้เป็นวัสดุดูดซับเพื่อทดสอบขนาดของวัสดุดูดซับที่เหมาะสม โดยได้ทำการเปรียบเทียบที่ขนาด 2-2.35 mm และ 2.36-3.34 mm พบว่าวัสดุดูดซับชนิด SANW ขนาด 2.36-3.34 mm ที่ปริมาณ 1 g มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าวัสดุดูดซับขนาด 2-2.35 mm ที่ปริมาณ 1 g เล็กน้อย โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 73.61 และ 72.44% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุดูดซับที่มีปริมาณ 5, 10 และ 20 g ทั้งขนาด 2-2.35 mm และ 2.36-3.34 mm มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100% โดยการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจะทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น (Hua-Sheng *et al*., 2007) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุดูดซับทั้งสองขนาดไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการนำไปใช้งานอาจจะไม่จำเป็นต้องคัดแยกขนาด เพื่อความสะดวกและประหยัดเวลา โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกวัสดุดูดซับ SANW ที่มีขนาด 2.36-3.34 mm ไปใช้ในการทดลองอื่นต่อไป เนื่องจากผลิตได้ง่ายกว่า เพราะในการผลิตวัสดุดูดซับจากตะกอนประปาที่มีขนาดเล็กลงจะมีสัดส่วนของเศษผงขนาดเล็กจำนวนมากกว่า ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้งานได้

ผลการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30,000-300,000 ppm (การทดลองแบบแบตช์)

ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30,000 ppm, 50,000 ppm, 100,000 ppm และ 300,000 ppm ได้นำวัสดุดูดซับ SANW ขนาด 2.36-3.34 mm มาใช้ในการทดสอบ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดจากการทดลองที่ผ่านมา โดยพบว่าวัสดุดูดซับ SANW มีประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30,000 ppm โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 88.63% รองลงมาคือ ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 50,000 ppm, 100,000 ppm และ 300,000 ppm มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 77.45, 51.81 และ 23.62% ตามลำดับ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงได้เลือกความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 30,000 ppm

ผลการศึกษาจุดเบรคทรูจ์ (Breakthrough) และจุดหมดสภาพ (Exhaustion point) ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Breakthrough curve)

ผลการทดลองการศึกษาหาจุดเบรคทรูจ์และจุดหมดสภาพ (กราฟเบรคทรูจ์) ของวัสดุดูดซับ S, SAW และ SANW ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 30,000 ppm โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (30 °C) (Figure 1)

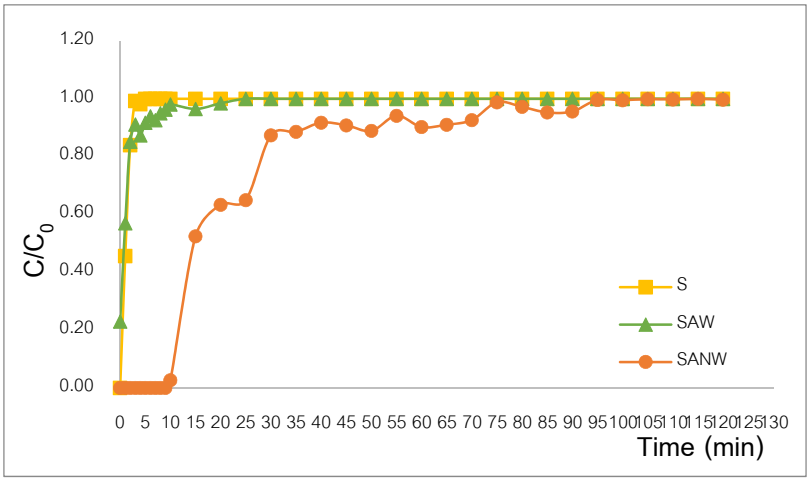


Figure 1 Breakthrough curve of CO_2 gas adsorption by S, SAW and SANW

จากผลการทดลองการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้น 30,000 ppm จนถึงจุดหมดสภาพ (C/C_0 = 1) พบว่าตั้งแต่นาทีที่ 0 ถึง 9 วัสดุดูดซับชนิด SANW มีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (C/C_0) เท่ากับ 0 คิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมถึงนาทีที่ 9 เท่ากับ 1.51 mg/g ของวัสดุดูดซับ SANW จนกระทั่งผ่านไป 95 min ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่าวัสดุดูดซับ SANW ไม่สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีก คิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมจนถึงจุดหมดสภาพ (C/C_0 = 1) ของวัสดุดูดซับ SANW เท่ากับ 4.40 mg/g ส่วนวัสดุดูดซับชนิด SAW พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (C/C_0) ในนาทีแรกมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.57 คิดเป็น

ความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในนาทีที่ 1 เท่ากับ 0.01 mg/g หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับ 1 ที่นาทีที่ 25 คิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมจนถึงจุดหมดสภาพ (C/C_0 = 1) ของวัสดุดูดซับ SAW เท่ากับ 0.16 mg/g สำหรับวัสดุดูดซับชนิด S พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (C/C_0) ในนาทีแรกมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.46 คิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในนาทีที่ 1 เท่ากับ 0.02 mg/g หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 1 ที่นาทีที่ 5 คิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมจนถึงจุดหมดสภาพ (C/C_0 = 1) ของวัสดุดูดซับ S เท่ากับ 0.03 mg/g

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับหลังฟื้นสภาพ

จากผลการศึกษาจุดเบรคทรูจ์และจุดหมดสภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ข้างต้น พบว่าวัสดุดูดซับ SANW มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด จึงได้นำวัสดุดูดซับ SANW ที่ผ่านการดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพดังกล่าวมาทำการฟื้นสภาพด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ การฟื้นสภาพโดยการนำวัสดุที่ผ่านการดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อีกครั้งตามวิธีการเตรียมวัสดุดูดซับ SANW เรียกวัสดุดูดซับนี้ว่า “NAOH” การนำวัสดุที่ผ่านการดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพไปอบด้วยความร้อน เรียกวัสดุดูดซับนี้ว่า “T” และการนำวัสดุที่ผ่านการดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพไปอบด้วยความร้อนแล้วนำไปดูดด้วยปั๊มสุญญากาศ เรียกวัสดุดูดซับนี้ว่า “TVP” จากนั้นนำวัสดุดูดซับที่ผ่านการฟื้นสภาพทั้ง 3 ชนิดมาทำการทดลองหาจุดเบรคทรูจ์และจุดหมดสภาพ โดยพบว่าตั้งแต่นาทีที่ 0 ถึง 5 วัสดุดูดซับที่ผ่านการฟื้นสภาพด้วยวิธีแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NAOH) สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 100% หรือคิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมถึงนาทีที่ 5 เท่ากับ 0.59 mg/g หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (C/C_0) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งผ่านไป 55 min ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (C/C_0) จะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่าวัสดุดูดซับอิ่มตัวและไม่สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีก คิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมจนถึงจุดหมดสภาพ (C/C_0 = 1) ของวัสดุดูดซับที่ผ่านการฟื้นสภาพด้วยวิธีแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.64 mg/g ส่วนวัสดุดูดซับที่ผ่านการฟื้นสภาพด้วยความร้อน (T) พบว่าสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 100% หรือคิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 0.03 mg/g ในนาทีที่ 1 หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (C/C_0) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในนาทีที่ 15 วัสดุดูดซับถึง จุดหมดสภาพ คิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมจนถึงจุดหมดสภาพ (C/C_0 = 1) ของวัสดุดูดซับที่ผ่านการฟื้นสภาพด้วยความร้อนเท่ากับ 0.37 mg/g สำหรับวัสดุดูดซับที่ผ่านการฟื้นสภาพด้วยความร้อนและปั๊มสุญญากาศ (TVP) สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 54.95% หรือคิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 0.02 mg/g ในนาทีที่ 1 หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (C/C_0) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในนาทีที่ 10

วัสดุดูดซับถึงจุดหมดสภาพ คิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมจนถึงจุดหมดสภาพ (C/C_0 = 1) ของวัสดุดูดซับที่ผ่านการฟื้นสภาพด้วยความร้อนและปั๊มสุญญากาศเท่ากับ 0.32 mg/g

สรุป

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการอบให้ความร้อน (S) เทียบกับวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วล้างออกด้วยน้ำ จากนั้นนำไปอบให้ความร้อน (SAW) และแบบไม่ล้างออก (SANW) พบว่าวัสดุดูดซับชนิด SANW ขนาด 2.36-3.34 mm มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด คิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมจนถึงจุดหมดสภาพ (C/C_0 = 1) ของวัสดุดูดซับ SANW, SAW และ S เท่ากับ 4.40, 0.16 และ 0.03 mg/g ตามลำดับนอกจากนี้การฟื้นสภาพของวัสดุดูดซับที่ผ่านการดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพด้วยวิธีแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NAOH) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพวัสดุดูดซับสูงสุด ตามด้วยการฟื้นสภาพด้วยความร้อน (T) และวิธีการฟื้นสภาพด้วยความร้อนและปั๊มสุญญากาศ (TVP) ตามลำดับ โดยคิดเป็นความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมจนถึงจุดหมดสภาพที่ 2.64, 0.37 และ 0.32 mg/g ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนการประปานครหลวง สำหรับตัวอย่างตะกอนประปา และทุนอุดหนุนการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รหัสโครงการวิจัย 57/06/ENV ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

เรวดี อนุวัฒนา, พรรณิภา กมลพรรณพร, วรพงษ์ พัทยาวรรณ, พัทธนันท์ นาถพินิจ, ฐิติรัตน์ ดิษฐ์แก้ว และนฤมล โสภารัตน์. 2558. การศึกษาชนิดของไอออนบวก ต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไข่เน่าและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, น. 321-324. **ในประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 39**. มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ, กรุงเทพฯ.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2559. **การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการใช้พลังงาน ปี 2558**. 10 หน้า.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2560. **รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2559**. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ลายเส้น ครีเอชั่น จำกัด, นนทบุรี.

Andres, J.M., L. Orjales, A. Narros, M.M. Fuente and M.E. Rodriguez. 2013. Carbon dioxide adsorption in chemically activated carbon from sewage sludge. **the Air & Waste Management Association** 63 (5): 557-564.

Hua-Sheng, Z., C. Zhu-qiang and L.Gang. 2007. A novel recovery technology of trace precious metals from waste water by combining agglomeration and adsorption. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** 17: 858-863.

คุณสมบัติทางกลของวัสดุประกอบจากเส้นใยปอสำหรับใช้ในงานซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต

Mechanical Properties of Composite from Jute Fiber for Repair and Strengthening of Concrete Structures

ปริมประภา ระมั่งทอง[1*] และ จักรพันธ์ เทือกต๊ะ[1]

Primprapa Ramangthong[1*] and Chakrapan Tuakta[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุประกอบจากเส้นใยปอสำหรับใช้ในงานซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ อัตราส่วนของเส้นใยโดยปริมาตร การเตรียมสภาพผิวเส้นใยด้วยวิธีการทางเคมีและวิธีการทางกายภาพ และสภาวะแวดล้อมรุนแรง จากการทดสอบวัสดุประกอบที่ทำจากเส้นใยปอและมีอิพอกซีเป็นแมทริกซ์พบว่า การเพิ่มจำนวนชั้นของเส้นใยปอ (1 2 และ 3 ชั้น) ส่งผลให้กำลังรับแรงดึง และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยได้กระจายตัวไปทั่วพอลิเมอร์แมทริกซ์ เมื่อเส้นใยปอได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และด้วยวิธีการทางความร้อน ส่งผลให้วัสดุประกอบเสริมเส้นใยปอมีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น เนื่องจากมีการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์แมทริกซ์ที่ดี แต่เมื่อนำวัสดุประกอบเสริมเส้นใยปอไปบ่มในสภาวะแวดล้อมรุนแรงคือ สภาวะเปียก สภาวะความเป็นด่าง และสภาวะน้ำทะเล พบว่าคุณสมบัติทางกลลดลง และจากการทดสอบการรับแรงอัดของคอนกรีตโอบรัดด้วยวัสดุประกอบเสริมเส้นใยปอพบว่าวัสดุประกอบเสริมเส้นใยปอช่วยทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น

ABSTRACT

This research studied the mechanical properties of jute fiber composite for repair and strengthening of concrete structures. It aimed to the investigate factors affecting tensile behavior of jute fiber composite, namely volume fraction of fiber, physical and chemical treatments of jute fiber surface, and severe environmental exposure. The results from tensile test of composite made from jute and epoxy matrix showed that the tensile strength and tensile modulus of the composite increased by fiber fraction (1 2 and 3 layers) due to better distribution of fiber in the polymer matrix. When jute fibers were treated by using sodium hydroxide solution and heat treatment, the tensile properties of the composite were improved. This can be attributed to the enhancement of the adhesion between fiber and polymer matrix. However, the tensile properties of the composite decreased under 3 environmental conditions, namely water, alkaline solution, and seawater. In addition, the compressive test of jute fiber-reinforced polymer composite confined concrete showed that the jute fiber reinforced polymer composite could increase the compressive strength of concrete.

Key Words: jute fiber, strengthening, durability, surface treatment

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil Engineer, Faculty of Engineer, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น บ้านพักอาศัย อาคาร และสะพาน อาจมีการเสื่อมสภาพหรือความเสียหายเนื่องจากการใช้งาน และการรับน้ำหนักบรรทุกเป็นเวลานาน หรืออาจเกิดจากอุบัติภัยต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น แผ่นดินไหว อุทกภัย หรืออัคคีภัย รวมไปถึงการเสื่อมสภาพจากสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง สาเหตุเหล่านี้จะส่งผลเสียต่อโครงสร้าง ทำให้กำลัง ความแข็งแรง และอายุในการใช้งานของโครงสร้างลดลง นอกจากนี้ การรับแรงกระทำในลักษณะที่ไม่ได้ออกแบบไว้ ก็มีความจำเป็นที่จะต้องทำการซ่อมแซม ปรับปรุง และเสริมกำลังเพื่อเพิ่มสมรรถนะให้กับโครงสร้าง ซึ่งวิธีการเสริมกำลังนั่นมีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น การเพิ่มองค์อาคารให้กับโครงสร้างเดิม การเพิ่มค้ำยัน การเพิ่มขนาดหน้าตัดขององค์อาคารเดิม การใช้วัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เป็นต้น ซึ่งในระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมามีการนิยมใช้วัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหรือ FRP (Fiber-Reinforced Polymer Composite) อย่างแพร่หลาย เนื่องจากข้อดีหลายประการ สำหรับเส้นใยที่นิยมใช้เพื่อผลิตเป็น FRP คือเส้นใยคาร์บอน (CFRP) และเส้นใยแก้ว (GFRP) ซึ่งลักษณะในการซ่อมแซม และเสริมกำลังให้กับโครงสร้างจะทำโดยการติดตั้งแผ่น FRP ที่ผิว (Externally Bonded FRP) การติดตั้ง FRP ใกล้ผิว (Near-Surface Mounded FRP)หรือการโอบรัดด้วย FRP (FRP Confinement)

กระบวนการผลิตเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วนั้นต้องใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดและสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังมีก๊าซและสารเคมีที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นของเสียระหว่างกระบวนการผลิต ในปัจจุบันจึงมีการหันมาศึกษาการใช้เส้นใยธรรมชาติมากขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นทรัพยากรทางเลือกที่เกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติและมีต้นทุนที่ต่ำ อย่างไรก็ดีการใช้เส้นใยธรรมชาติในงานวิศวกรรมโยธานั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากข้อจำกัดหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น สมบัติทางกลของวัสดุประกอบนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิด คุณภาพ และกระบวนการเตรียมเส้นใย นอกจากนี้ความคงทนของเส้นใยธรรมชาตินั้นยังคงเป็นปัญหาที่ต้องศึกษา โดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้กับโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากสภาพความเป็นด่างสูงในเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ต้าและความเป็นรูพรุนของคอนกรีตที่ทำให้สารเคมีซึมผ่านเข้าได้ อีกทั้งการที่เส้นใยธรรมชาติสามารถดูดซับความชื้นได้ดี (Hydrophilic) อาจทำให้มีปัญหาเมื่อนำมาใช้ในพื้นที่เขตร้อนชื้นอย่างเช่นประเทศไทย ส่งผลให้ความยึดเหนี่ยว (Adhesion) ระหว่างเส้นใยและแมทริกซ์ในวัสดุคอมโพสิตไม่ดีพอ ทำให้กำลังรับแรงและสมบัติทางกลอื่นๆต่ำกว่าที่จะนำไปใช้ในงานโครงสร้างได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุประกอบที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติเพื่อให้ได้มาซึ่งกระบวนการผลิตและอัตราส่วนผสมของวัสดุประกอบที่เหมาะสมกับการซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุเสริมแรงคือเส้นใยปอที่มีลักษณะเป็นผ้าทอสองทิศทาง มีวัสดุพอลิเมอร์แมทริกซ์ คือ อิพอกซีเรซินชนิด 2 ส่วนประกอบ (อัตราส่วนผสม a:b = 2:1 โดยน้ำหนัก)

(A) (B)

Figure 1 Jute fiber fabric (A) and Epoxy resin (B)

การเตรียมเส้นใยธรรมชาติ

เตรียมเส้นใยปอที่อยู่ในรูปผ้าทอ (Figure 1A) ให้มีขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM 3039 (Figure 2) จากนั้นปรับสภาพเส้นใยด้วย 2 กระบวนการ คือ (1) ปรับสภาพเส้นใยด้วยอัลคาไล โดยเริ่มต้นด้วยการนำเส้นใยปอล้างน้ำสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนและทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นแช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำเส้นใยไปล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้หมดไป จากนั้นนำเส้นใยไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Yan *et al.*,2012) และ (2) ปรับสภาพเส้นใยด้วยวิธีการทางความร้อน โดยนำเส้นใยปอที่เตรียมไว้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นใยที่ผ่านการอบแล้วไปเก็บไว้ในโถสุญญากาศเพื่อป้องกันการดูดความชื้น (Sen and Reddy, 2014)

การเตรียมตัวอย่างวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอ (JFRP)

วัสดุประกอบพอลิเมอร์ขึ้นรูปโดยวิธีการใช้มือทาขึ้นรูป (Hand-layup) โดยนำเส้นใยธรรมชาติวางลงบนแม่แบบ จากนั้นทาอิพอกซีเรซินลงบนผ้าทอเส้นใยที่เตรียมไว้โดยทาไปตามแนวยาวของผ้าทอที่มีการจัดเรียงเส้นใยในแนวขวาง (WEFT)ไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นไล่ฟองด้วยลูกกลิ้งโดยกลิ้งไปในทิศทางเดียวกันกับเส้นใยแนวขวาง แล้วปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำออกจากแม่แบบ แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 12 วันเพื่อให้ตัวอย่างวัสดุประกอบพัฒนาสมบัติทางกล

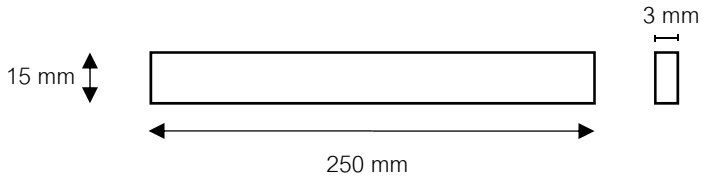


Figure 2 Tensile test specimen drawing of jute fiber reinforced polymer composite

การเตรียมบ่มตัวอย่าง JFRP เพื่อการทดสอบความคงทนของวัสดุ

ในการศึกษาความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงของ JFRP มีการบ่มตัวอย่าง ดังนี้

1. สภาวะเปียก นำวัสดุประกอบพอลิเมอร์บ่มต่อเนื่องด้วยน้ำ เป็นเวลา 2 และ 4 สัปดาห์
2. สภาวะน้ำทะเล นำวัสดุประกอบพอลิเมอร์บ่มต่อเนื่องด้วยสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 และ 4 สัปดาห์ และ
3. สภาวะความเป็นด่าง นำวัสดุประกอบพอลิเมอร์บ่มต่อเนื่องด้วยสารละลายด่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีค่า pH เท่ากับ 12.5 เป็นเวลา 2 และ 4 สัปดาห์

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเพื่อเสริมกำลังด้วย JFRP

เตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร จำนวน 42 ตัวอย่าง แล้วทำการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นขัดผิวคอนกรีตให้เรียบก่อนการโอบรัด JFRP และเตรียมผ้าทอเส้นใยปอขนาด 200 x 415 ตารางมิลลิเมตรที่ผ่านการเตรียมเส้นใยตามที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อเสริมกำลังให้กับตัวอย่างคอนกรีตโดยการโอบรัดจำนวน 3 ชั้นต่อตัวอย่าง

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอ (JFRP)

การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039 โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine,UTM) โดยตัวอย่างทดสอบมีความยาวทั้งหมด 250 mm ความกว้าง 15 mm และความยาวของส่วนยึดจับ 55 mm ทำการทดสอบโดยกำหนดให้การเคลื่อนที่ของหัวจับ (Cross-head Speed) ด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 2 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ในการทดสอบจะทำการบันทึกวีดีโอในขณะทำการทดสอบ เพื่อนำไปหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นโดยวิธี 2D Digital Image Correlation ในโปรแกรม MATLAB (Ghani *et al*.,2016) ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจากเครื่อง UTM จะบันทึกค่าแรงดึง จนตัวอย่างเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก

การทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้เครื่องทดสอบ UTM ทำการติดตั้งเสตรนเกจบริเวณกึ่งกลางของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่โอบรัดด้วย JFRP ตามแนวแกนและแนวขวาง เพื่อวัดความเครียดตามแนวแกนภายใต้แรงอัด (Axial Strain) และความเครียดตามขวาง (Lateral Strain) ใน JFRP ที่ใช้ในการโอบรัด จากนั้นทำการทดสอบโดยกำหนดให้อัตราการเคลื่อนที่ของหัวกดที่ 1 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถูกบันทึกโดยเครื่อง Data Logger จะบันทึกค่าแรงอัดและค่าความเครียด จนตัวอย่างเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยปอใน JFRP

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ JFRP โดยมีอิพอกซีเรซินเป็นวัสดุแมทริกซ์ ด้วยการเพิ่มอัตราส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยต่อวัสดุแมทริกซ์ แบ่งเป็นจำนวนชั้นผ้าทอ 1 2 และ 3 ชั้น แสดงดัง Table 1 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของเส้นใยในวัสดุประกอบ ส่งผลให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มีมากขึ้นได้กระจายตัวไปทั่ววัสดุแมทริกซ์ทำให้เกิดการถ่ายแรงระหว่างเส้นใยได้ดีขึ้น โดย JFRP มีกำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 90 MPa เป็น 94 และ 101 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็น 4.44% และ 12.22% ตามลำดับ และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นจาก 3.8 GPa เป็น 4.0 และ 4.3 GPa หรือเพิ่มขึ้นเป็น 5.26% และ 13.16% ตามลำดับ ทั้งนี้ JFRP ในการทดสอบส่วนนี้มิได้ผ่านการเตรียมสภาพเส้นใย

Table 1 Tensile properties of JFRP by volume fraction of fiber

Specimen	Layer of Fiber (Fraction of Fiber)	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Ultimate Strain (%)
Jute/Epoxy	1 (17%)	90	3.8	2.50
	2 (24%)	94	4.0	2.64
	3 (28%)	101	4.3	2.86

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ JFRP ที่ผ่านกรรมวิธีเตรียมสภาพของเส้นใย

จาก Table 2 พบว่า JFRP ที่ผลิตจากเส้นใยปอจำนวน 3 ชั้น ที่ปรับสภาพด้วยอัลคาไลแล้วมีกำลังรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้นจาก JFRP ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพจาก 101 MPa เป็น 126 MPa หรือเพิ่มขึ้น 24.75% มอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นจาก 4.3 GPa เป็น 5.4 GPa หรือเพิ่มขึ้น 25.58% ในขณะที่ JFRP ที่ปรับสภาพด้วยความร้อนมีกำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 117 MPa หรือเพิ่มขึ้นมา 15.84% ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มเป็น 4.7 GPa หรือเพิ่มขึ้นมา 9.30%

Table 2 Tensile properties of JFRP by method of treatment

Specimen	Method of Treatment	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Ultimate Strain (%)
Jute/Epoxy	Untreated	101	4.3	2.86
	Alkali-Treated	126	5.4	7.34
	Heat-Treated	117	4.7	2.52

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ JFRP โดยการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใย สามารถสรุปได้ว่าการปรับสภาพทั้ง 2 วิธี สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบให้ดีขึ้นได้ โดยที่การปรับสภาพด้วยสารละลายอัลคาไลนั้นช่วยทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีความสะอาดมากขึ้น เนื่องจากสารละลาย NaOH ได้กำจัดเฮมิเซลลูโลส ไขมัน ลิกนิน และน้ำมันออกจากพื้นผิวของเส้นใยส่งผลให้มีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น โดยพื้นผิวที่ขรุขระนี้ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับแมทริกซ์ดีขึ้น ทั้งยังช่วยให้การถ่ายแรงระหว่างเส้นใยให้ดีมากขึ้น ส่วนการปรับสภาพด้วยความร้อน จะช่วยให้เส้นใยกำจัดความชื้นที่มีมากบนพื้นผิวออกไป โดยความชื้นเป็นตัวที่ทำให้เส้นใยกับวัสดุแมทริกซ์มีการยึดเหนี่ยวระหว่างกันได้ไม่ดี การกำจัดความชื้นออกไปอาจส่งผลให้เส้นใยมีความสามารถในการดูดซึมแมทริกซ์ในขณะการขึ้นรูปได้ดีส่งผลให้เส้นใยและวัสดุแมทริกซ์เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันได้ดีมากขึ้น

ความคงทนของ JFRP ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรง

Table 3 แสดงผลการทดสอบความคงทนของ JFRP พบว่าสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบมีค่าลดลง โดยในสภาวะเปียก JFRP ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวมีกำลังรับแรงดึงและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นลดลงสูงสุด 7.43% และ 19.85% ตามลำดับ ในขณะที่ JFRP ที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยอัลคาไล และความร้อน มีกำลังรับแรงดึงลดลงสูงสุด 13.48% และ 9.40% ตามลำดับ และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นลดลง 18.05% และ 5.11% ตามลำดับ และเมื่อวัสดุประกอบอยู่ในสภาวะความเป็นด่างพบว่า JFRP ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวมีกำลังรับแรงดึง และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นลดลงสูงสุด 18.20% และ 33.67% ตามลำดับ ในขณะที่ JFRP ที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยอัลคาไล และความร้อน มีกำลังรับแรงดึงลดลงสูงสุด 16.88% และ 3.84% ตามลำดับ และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นลดลง 25.54% และ 26.16% ตามลำดับ และในสภาวะน้ำทะเลพบว่า JFRP ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวมีกำลังรับแรงดึง และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นลดลงสูงสุด 9.64% และ 27.76%

ตามลำดับ ในขณะที่ JFRP ที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยอัลคาไล และความร้อน มีกำลังรับแรงดึงลดลงสูงสุด 11.09% และ 4.72% ตามลำดับ และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นลดลง 18.69% และ 10.86% ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลที่ลดลงภายใต้สภาวะแวดล้อมรุนแรง พบว่า JFRP ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใย ยังคงมีคุณสมบัติเชิงกลที่มากกว่า JFRP ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ แม้ว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงในบางสภาวะแวดล้อมรุนแรงจะมีค่ามากกว่าก็ตาม ดังนั้นสรุปได้ว่าการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยสามารถช่วยให้ JFRP ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงได้ดี โดยวิธีที่สามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดีที่สุดคือการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยด้วยความร้อน

Table 3 Durability of jute fiber reinforced polymer composite (JFRP)

Jute/Epoxy composite	Conditions of Environment	2 Weeks			4 Weeks		
		Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Ultimate Strain (%)	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Ultimate Strain (%)
Untreated	water	94	4.0	1.99	93	3.5	2.69
	Alkaline	93	3.2	2.61	82	2.9	3.59
	Sea Water	96	3.2	2.39	91	3.1	2.69
Alkali-Treated	water	115	5.3	8.56	109	4.4	9.50
	Alkaline	109	4.4	6.99	105	4.0	8.15
	Sea Water	114	4.5	8.56	112	4.4	9.08
Heat-Treated	water	114	4.5	3.05	106	4.4	2.99
	Alkaline	111	4.4	3.19	113	3.5	3.30
	Sea Water	114	4.5	2.72	112	4.2	2.93

Yan and Chouw (2015) ได้อธิบายว่าการลดลงของคุณสมบัติเชิงกล มีสาเหตุมาจาก การเสื่อมสภาพของรอยต่อ (Interface) ระหว่างเส้นใยและอิพอกซี หลังจากการบ่มแล้ววัสดุประกอบมีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติจะมีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส 71-75% และเฮมิเซลลูโลส 18.6-20.6% โดยองค์ประกอบเหล่านี้จะมีกลุ่มของไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และคาร์บอกซิล (Carboxyl) ซึ่งจะสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำผ่านพันธะไฮโดรเจนได้ การที่มีกลุ่มไฮดรอกซิลปริมาณมากๆในเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส จะส่งผลให้เกิดการหลุดออกของเส้นใยจากอิพอกซี ส่วนอิพอกซีเรซินหลังจากบ่มเป็นระยะเวลานานทำให้มีการซึมผ่านของความชื้นก่อให้เกิดรอยแตกร้าวได้ และส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพทางเคมีและทางกายภาพได้ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีคือ ห่วงโซ่ของพอลิเมอร์ถูกทำลาย และยังส่งผลถึงแรงยึดเหนี่ยวที่รอยต่อด้วย และการเสื่อมสภาพทางกายภาพของอิพอกซีเรซินคือ การบวม (Swelling) และการเกิด Relaxation ของพอลิเมอร์ จึงสามารถสรุปได้ว่าการยึดเหนี่ยวของเส้นใย และแมทริกซ์ที่ไม่ดี มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอย่างมาก เนื่องจากการถ่ายแรงระหว่างเส้นใยจะต้องผ่านรอยต่อของเส้นใยและแมทริกซ์ ดังนั้นการเสื่อมสภาพ

ของเส้นใย อิพอกซี และพื้นผิวรอยต่อระหว่างเส้นใยและแมทริกซ์ของวัสดุประกอบจึงมีส่วนทำให้คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุในสภาวะแวดล้อมรุนแรงลดลงได้

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่โอบรัดด้วย JFRP

Table 4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่โอบรัดด้วย JFRP จำนวน 3 ชั้น ในสภาวะแห้งปกติและสภาวะบ่มในน้ำต่อเนื่อง 4 สัปดาห์ โดยเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย JFRP กับคอนกรีตที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง พบว่าคอนกรีตที่โอบรัดด้วย JFRP ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยอัลคาไลให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ 53 MPa โดยเพิ่มขึ้นมา 39% รองลงมาเป็นคอนกรีตที่โอบรัดด้วย JFRP ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนมีกำลังรับแรงอัด 50 MPa หรือเพิ่มขึ้นมา 32% และสุดท้ายเป็นคอนกรีตที่โอบรัดด้วย JFRP ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 43 MPa เพิ่มขึ้นมา 12%

Table 4 Compressive test of JFRP confined concrete

Specimens	Dry Condition			Water Condition (4 Weeks)		
	Compressive Strength (MPa)	Axial Strain (%)	Lateral Strain (%)	Compressive Strength (MPa)	Axial Strain (%)	Lateral Strain (%)
Unconfined Concrete	38	0.20	-	56	0.25	-
Untreated JFRP-Confined Concrete	43	0.55	0.62	52	0.34	0.09
Alkali-Treated JFRP-Confined Concrete	53	0.58	1.34	54	0.52	1.07
Heat-Treated JFRP-Confined Concrete	50	0.26	0.54	56	0.34	0.30

เมื่อพิจารณาตัวอย่างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกต่อเนื่องเป็นเวลา 30 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตคอนกรีตเปลือยและคอนกรีตที่โอบรัดด้วย JFRP มีค่าไม่ต่างกันมากนัก อาจมีสาเหตุมาจากคอนกรีตมีการพัฒนากำลังขึ้นระหว่างการบ่มในน้ำแต่กลับมีการขยายตัวด้านข้างในขณะที่รับแรงอัดลดลงทำให้ JFRP ไม่สามารถทำงานได้ หรืออีกสาเหตุคือ วัสดุประกอบเกิดการบวมตัว (Swelling) ทำให้รอยต่อระหว่างคอนกรีตกับวัสดุประกอบเสื่อมสภาพลง ส่งผลให้วัสดุประกอบไม่สามารถออกแรงโอบรัดได้

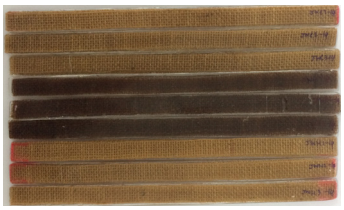
(A)  (B) (C)

Figure 3 Specimens of JFRP (A) and JFRP-Confined Concrete (B,C)

สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบจากเส้นใยปอสำหรับใช้ในงานซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต พบว่า

1. คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนเส้นใยต่อวัสดุแมทริกซ์เพิ่มขึ้น

2. คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามวิธีการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยโดยเรียงลำดับการเพิ่มขึ้นจากมากไปน้อย ดังนี้ การปรับสภาพด้วยอัลคาไล การปรับสภาพด้วยความร้อน และไม่ปรับสภาพเส้นใย

3. คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอจะมีค่าลดลง เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมรุนแรงโดยเรียงลำดับการลดลงจากมากไปน้อย ดังนี้ สภาวะความเป็นด่าง สภาวะน้ำทะเล และสภาวะเปียก

4. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยปอจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยคอนกรีตที่โอบรัดด้วยวัสดุประกอบเสริมเส้นใยปอปรับสภาพด้วยอัลคาไลมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 รหัสโครงการ ว-ท(ด) 10.59 และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

American Society for Testing and Materials. 2007. **Standard Test method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. D3039/D3039M-07

Ghani, A.F.Ab., M.B. Ali., S. Dharmalingam and J. Mahmud. 2016. Digital Image Correlation (DIC) Technique in Measuring Strain Using Opensource Platform Ncorr. **Journal of Advanced Research in Applied Mechanics**. 26: 10-21.

Sen, T. and H.N.J. Reddy. 2014. Flexural strengthening of rc beams using natural sisal and artificial carbon and glass fabric reinforced composite system. **Sustainable Cities and Society**. 10: 195-206.

Yan, L. and N. Chouw. 2015. Effect of water, seawater and alkaline solution ageing on mechanical properties of flax fabric/epoxy composites used for civil engineering applications. **Construction and Building Materials**. 99: 118-127.

Yan, L., N. Chouw and X. Yuan. 2012. Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 31: 425-437.

การลดความเค้นหนาแน่นของแผ่นกึ่งอนันต์มีรูวงกลมเดียวอยู่ใกล้ขอบภายใต้ภาระดึงโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

The Reduction of Stress Concentration of a Semi-infinite Plate with a Circular Hole near the Edge Under Tension Load Using Finite Element Method

วัชระ เครือรัฐติกาล[1*] สุทธิพงษ์ สะอาดเอี่ยม[1] และ นภัสพร บูรพาวัลย์[1]

Watchara Kruerattikarn[1*], Sutthiphong Sa-Ard-Iam[1] and Napasporn Burapawal[1]

บทคัดย่อ

ในทางปฏิบัติ ชิ้นงานทางวิศวกรรมอย่างน้อยมีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด และหรือ รูปทรง เมื่อชิ้นงานสี่เหลี่ยมกึ่งอนันต์มีรูกลมเดียวอยู่ใกล้ขอบภายใต้ภาระดึงตามแนวแกน การกระจายตัวของความเค้นจะไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของชิ้นงาน ซึ่งนำมาให้เกิดความเสียหายของชิ้นงานที่ตรงขอบของรูเนื่องจากเกิดความเค้นหนาแน่นสูง วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของรูช่วยเพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้น ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นสามารถลดได้ถึง 15.7 % สำหรับใช้สองรูช่วย และ 18.5 % สำหรับใช้สี่รูช่วย โดยวาง ตำแหน่งของรูช่วย ทั้งสองด้านของรูวงกลมหลัก ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงตำแหน่ง ขนาด ของรูช่วยทำให้การไหลของความเค้นราบเรียบขึ้นตลอดทั้งแผ่น

ABSTRACT

In practice, engineering components have at least minimal changes in section and/or shape. When a single circular hole near the edge is introduced in a semi-infinite rectangular plate under axial tension load, the stress distribution is not uniform throughout the cross section. This will lead to failure of the component at the edge of the hole of high stress concentration. Finite element method is used to locate optimum auxiliary holes for the stress reduction. The stress concentration factor can be reduced up to 15.7 % for using two auxiliary holes and 18.5 % for using four auxiliary holes by locate auxiliary holes on either side of main circular hole. Results reveals that the introduction of the auxiliary holes at a optimum location and sizes helps to smooth flow of the stress pass through the plate.

Key Words :Finite element, Stress concentration factor, Circular hole, Tension load, Auxiliary hole

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

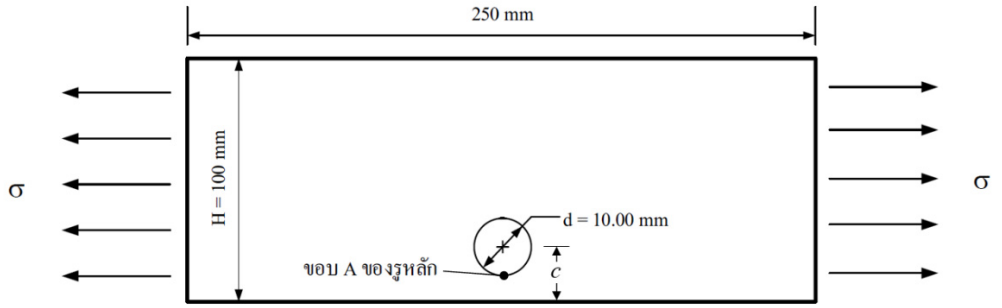
ในการออกแบบชิ้นงานต่าง ๆ ในทางวิศวกรรม ผู้ออกแบบต้องระมัดระวัง เมื่อชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัด หรือรูปทรง ภายใต้ภาระงานที่มากระทำ ทำให้การไหลของความเค้นไม่ราบเรียบ เป็นผลให้เกิดความเค้นหนาแน่นมีค่าสูงในบริเวณนี้ อาจเกิดความเสียหายของชิ้นงานได้ การศึกษาและออกแบบการทำให้ความเค้นหนาแน่นบริเวณนี้ลดลง จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

เมื่อมีภาระงานดึงมากระทำตามแนวยาวของชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีรูวงกลมเดียวอยู่ใกล้ขอบ ทำให้เกิดความเค้นหนาแน่นบริเวณขอบของรูวงกลมสูง Erickson และ Riley (1978) ได้ศึกษาโดยเพิ่มรูช่วย 2 รูวางไว้ก่อนและหลังด้านข้างรูกลมเดียวอยู่ตรงกลางของชิ้นงานตามแนวของแรงดึง โดยการทดลองใช้วิธีโฟโตอีลาสติก ผลที่ได้ช่วยลดความเค้นหนาแน่นลง 21% - 31% Meguid (1986) ใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ลดค่าความเค้นหนาแน่นของชิ้นงานที่มีรูกลมเดียวตรงกลางของชิ้นงาน รับภาระแรงดึงตามแนวแกน โดยใช้สองรูช่วย ทำให้ลดค่าความเค้นหนาแน่นได้ 5.7% - 11 % Meguid และ Gong (1993) ได้ศึกษาความเค้นหนาแน่นบริเวณรอบรูวงกลมเดียวบนแผ่นสี่เหลี่ยม โดยวิธีโฟโตอีลาสติก ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Ulrich และ Moslehy (1995) นำเสนอวิธีการบาวน์ดารีเอลิเมนต์ มาใช้วิเคราะห์โดยใช้รูช่วยเพื่อลดความเค้นหนาแน่นบริเวณรูวงกลมและวงรีที่อยู่ตรงกลางชิ้นงาน Younis (2006) ได้ ศึกษาการกระจายความเค้นบริเวณรูกลม เพื่อลดความเค้นหนาแน่นในบริเวณนั้น โดยใช้วิธีโฟโตอีลาสติก Yang *et al*. (2010) ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาความเค้นหนาแน่นและความเครียดหนาแน่นที่เกิดขึ้นบริเวณรูกลมตรงกลางบนแผ่นชิ้นงานภายใต้ภาระดัด Sburlati (2013) ได้นำเสนอการสวมใส่แหวนลงไปในรูกลม เพื่อลดความเค้นหนาแน่นบริเวณรูกลมของชิ้นงาน วัชระ และคณะ (2015) ได้ใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์เพื่อลดความเค้นหนาแน่นของรูวงกลมเดียวภายใต้แรงดึงโดยใช้ 2 และ 4 รูช่วย เรียงต่อด้านข้างทั้งสองด้านของรูหลัก ผลที่ได้ ลดค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นลงได้ 14.3 % และ 18.8 % ตามลำดับ วัชระ และคณะ (2016) ได้ทำการวิเคราะห์ลดค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นของรูวงกลมเดียว โดยใช้ 2 รูกลมช่วย และ 2 รูวงรีช่วยโดยวางตำแหน่งซ้อนรูวงกลมหลัก ผลที่ได้ สามารถลดค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นลงได้ 19.8 % และ 22.2 % ตามลำดับ Aizhong Lu *et al*. (2017) ได้นำเสนอ 3 หลักการในการวิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณวงรีที่อยู่ตรงกลางของชิ้นงาน

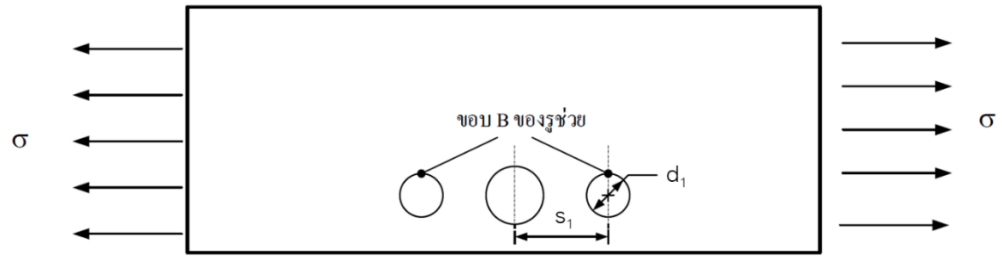
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเค้นหนาแน่นบริเวณรูวงกลมเดียวอยู่ใกล้ขอบของชิ้นงานสี่เหลี่ยมกึ่งอนันต์ภายใต้แรงดึงตามแนวแกน ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และทำการวิเคราะห์เพื่อลดความเค้นหนาแน่นสูงสุดบริเวณขอบของรูหลักโดยใช้รูช่วย 2 รู และ 4 รู โดยวางเรียงทั้งสองด้านของรูวงกลมเดียวอยู่ใกล้ขอบชิ้นงาน

วิธีการดำเนินการวิจัย

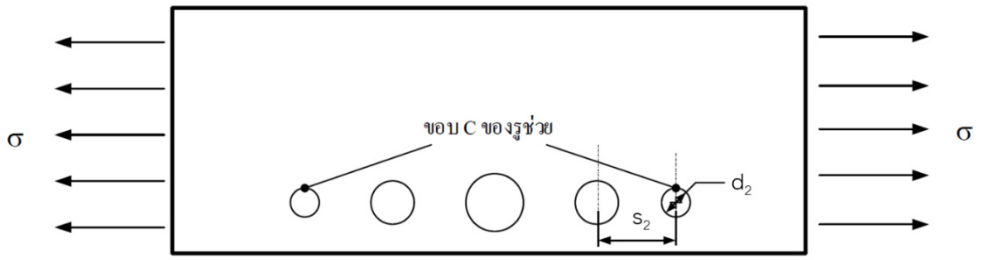
การวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ 3 รูปแบบ ดังแสดงตาม Figure 1 โดย model A มีรูหลักเพียงรูเดียว model B มีรูหลักและรูช่วย 2 รู และ model C มีรูหลักและรูช่วย 4 รู โดย model A ทำการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการวิจัยของ Mindlin (1948) เพื่อยืนยันรูปแบบโมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ว่าสามารถ นำไปใช้ใน model B และ Model C ได้ model B ทำการเปลี่ยนขนาดของรูช่วย d_1 และระยะห่าง S_1 model C ทำการเปลี่ยนขนาดของรูช่วย d_2 และ และระยะห่าง S_2



(a) Model A



(b) Model B



(c) Model C

Figure 1 Details of three models analyzed in this study.

ขนาดของแผ่นสี่เหลี่ยมมีรูตรงกลางตาม Figure 1 โดยความกว้าง H เท่ากับ 100 มิลลิเมตร และความยาว 250 มิลลิเมตร ขนาดของรูหลักมีขนาด 10 มิลลิเมตร กำหนดเงื่อนไขขอบเขตในระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดหน้าตัดด้านซ้ายมือของชิ้นงานไม่ยอมให้มีการเคลื่อนตัว และหน้าตัดด้านขวามือมีแรงดึงกระทำกระจายสม่ำเสมอตามแนวแกนขนาด 500 นิวตัน ขนาดของเอลิเมนต์ 4 มม. จำนวน 31 155 เอลิเมนต์

Figure 2 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นตามพิกัดเชิงขั้วถูกนำเสนอโดย Timoshenko และ Goodier (1970)

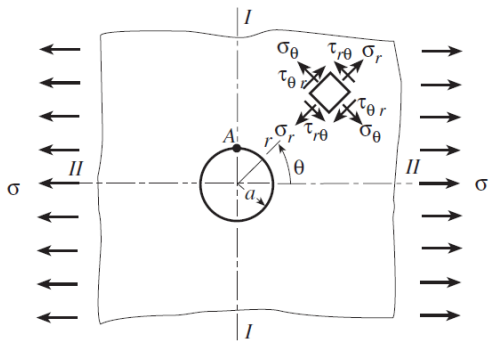


Figure 2 Infinite thin element with hole under tensile load.

$$\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)+\frac{1}{2}\sigma\left(1-\frac{4a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}\sigma\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)-\frac{1}{2}\sigma\left(1+\frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \quad (2)$$

พิจารณาที่หน้าตัด *I-I* ที่ค่ามุม $\theta = \pi/2$ สมการที่ 2 เปลี่ยนเป็น

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}\sigma\left(2+\frac{a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right) \quad (3)$$

จาก Figure 1 (a) Model A พิจารณาที่ขอบด้านบนสุดตรงกลางของชิ้นงาน ค่า a = 5 และ r = 90 นำไปแทนค่าในสมการที่ 3 ได้ $\sigma_\theta = 1.0016\sigma$ ขนาดความเค้นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าขนาดความกว้างของชิ้นงานสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้

พิจารณาที่หน้าตัด *II-II* ที่ค่ามุม $\theta = 0$ สมการที่ 1 เปลี่ยนเป็น

$$\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma\left(2-\frac{5a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right) \quad (4)$$

จาก Figure 1 (a) Model A พิจารณาที่ขอบด้านขาวมือตรงกลางของชิ้นงาน ค่า a = 5 และ r = 125 นำไปแทนค่าในสมการที่ 4 ได้ $\sigma_r = 0.996\sigma$ ขนาดความเค้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าขนาดความยาวของชิ้นงานสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้

ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นที่ตำแหน่ง A (K_{tgA}) คำนวณได้จากสมการที่ 5

$$K_{tgA} = \sigma_A / \sigma \quad (5)$$

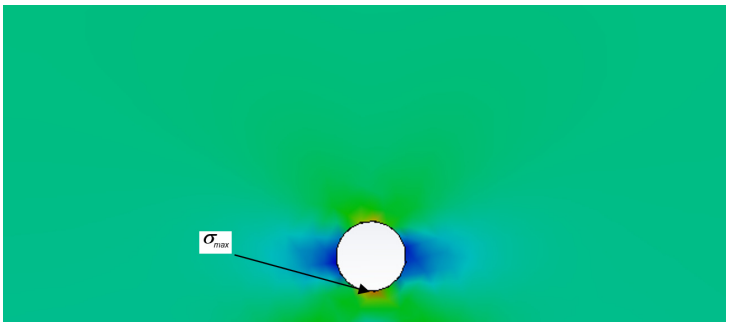
โดย σ_A คือ ความเค้นตั้งฉากที่ตำแหน่ง A ที่แสดงใน Figure 1 (a)

σ คือ ความเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นกับแผ่นกึ่งอนันต์

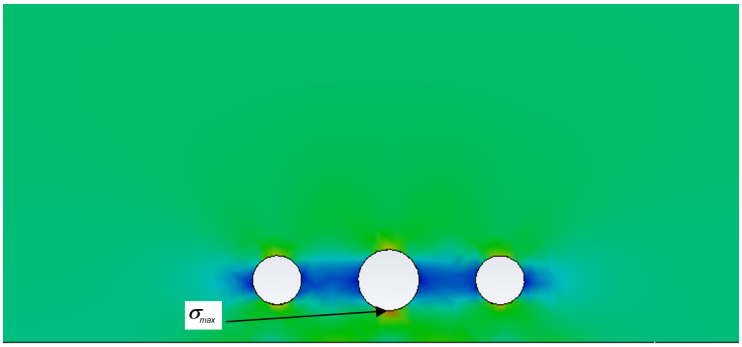
ผลและวิจารณ์ผลการคำนวณ

Model A การคำนวณโดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ σ_{max} มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง A ของขอบของรูหลัก ดังตำแหน่งที่แสดงใน Figure 3 และผลการคำนวณหาค่า K_{tgA} ได้ 3.64 ซึ่งค่าที่ได้ถือว่าใกล้เคียงมากกับ Mindlin (1948) ที่ 3.65

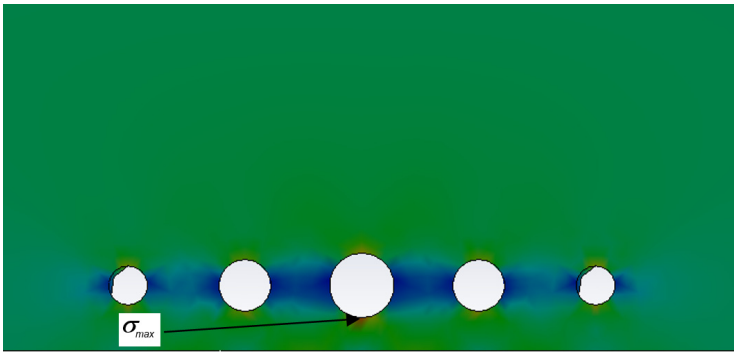
Model B และ Model C การคำนวณโดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ σ_{max} มีค่าสูงสุดที่ขอบของรูหลัก ดังตำแหน่งที่แสดงใน Figure 3 และผลการคำนวณหาค่า K_{tgA} ที่ตำแหน่ง σ_{max} ค่าที่ได้แสดงใน Table 1 และ Table 2 ตามลำดับ



(a) Model A



(b) Model B



(c) Model C

Figure 3 Position of σ_{max} at the edge A of main hole in three models.

Table 1 Stress concentration factor at edge A of main hole in model B.

$S_1/d = 1.2$		$S_1/d = 1.4$		$S_1/d = 1.6$		$S_1/d = 1.8$		$S_1/d = 2.0$	
d_1/d	K_{tgA}	d_1/d	K_{tgA}	d_1/d	K_{tgA}	d_1/d	K_{tgA}	d_1/d	K_{tgA}
0.4	3.650	0.4	3.686	0.4	3.716	0.4	3.738	0.4	3.758
0.5	3.588	0.5	3.622	0.5	3.646	0.5	3.666	0.5	3.706
0.6	3.494	0.6	3.526	0.6	3.556	0.6	3.584	0.6	3.638
0.7	3.362	0.7	3.404	0.7	3.460	0.7	3.488	0.7	3.554
0.8	3.244	0.8	3.284	0.8	3.339	0.8	3.386	0.8	3.446
0.9	3.068	0.9	3.136	0.9	3.220	0.9	3.268	0.9	3.322

Table 2 Stress concentration factor at edge A of main hole in model C.

$S_1/d = 1.2$			$S_1/d = 1.4$			$S_1/d = 1.6$			$S_1/d = 1.8$			$S_1/d = 2.0$		
d_1/d	d_2/d	K_{tgA}	d_1/d	d_2/d	K_{tgA}	d_1/d	d_2/d	K_{tgA}	d_1/d	d_2/d	K_{tgA}	d_1/d	d_2/d	K_{tgA}
0.7	0.4	3.204	0.7	0.4	3.266	0.7	0.4	3.340	0.7	0.4	3.404	0.7	0.4	3.438
	0.5	3.244		0.5	3.286		0.5	3.356		0.5	3.410		0.5	3.460
	0.6	3.259		0.6	3.330		0.6	3.401		0.6	3.466		0.6	3.534
0.8	0.4	3.202	0.8	0.4	3.250	0.8	0.4	3.300	0.8	0.4	3.350	0.8	0.4	3.382
	0.5	3.270		0.5	3.306		0.5	3.346		0.5	3.374		0.5	3.400
	0.6	3.310		0.6	3.328		0.6	3.368		0.6	3.393		0.6	3.421
	0.7	3.334		0.7	3.362		0.7	3.400		0.7	3.425		0.7	3.447
0.9	0.4	2.968	0.9	0.4	3.056	0.9	0.4	3.118	0.9	0.4	3.230	0.9	0.4	3.292
	0.5	2.992		0.5	3.092		0.5	3.152		0.5	3.248		0.5	3.304
	0.6	3.020		0.6	3.112		0.6	3.174		0.6	3.277		0.6	3.320
	0.7	3.047		0.7	3.138		0.7	3.214		0.7	3.304		0.7	3.356
	0.8	3.064		0.8	3.180		0.8	3.258		0.8	3.339		0.8	3.371

จาก Table 1 Model B ที่ $S_1/d = 0.5$ เมื่อ d_1/d มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า K_{tgA} มีค่าลดลง และมีลักษณะความสัมพันธ์เดียวกัน กับที่ $S_1/d = 0.6$ $S_1/d = 0.7$ $S_1/d = 0.8$ และ $S_1/d = 0.9$ พิจารณาที่ $d_1/d = 0.4$ เมื่อ S_1/d มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า K_{tgA} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีลักษณะความสัมพันธ์เดียวกัน กับที่ $d_1/d = 0.5$ $d_1/d = 0.6$ $d_1/d = 0.7$ $d_1/d = 0.8$ และ $d_1/d = 0.9$

เมื่อนำค่าจาก Table 1 มาสร้างกราฟได้ความสัมพันธ์แสดงดัง Figure 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างรูหลักและรูช่วยมีค่ามากขึ้น ทำให้ค่า K_{tgA} มีแนวโน้มลดลง ขณะที่ระยะห่างระหว่างรูหลักและรูช่วยคงที่ ขนาดของรูช่วยมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ค่า K_{tgA} มีแนวโน้มลดลง ค่า K_{tgA} ใน model B สามารถลดลงได้สูงสุด 15.7 % เมื่อเปรียบเทียบกับ model A

จาก Table 2 Model C เมื่อค่า $S_1/d = 1.2$ $d_1/d = 0.7$ คงที่ ถ้า d_2/d มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่า K_{tgA} เพิ่มขึ้น และมีลักษณะความสัมพันธ์เดียวกันกับที่ $d_1/d = 0.8$ และ $d_1/d = 0.9$ แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่า S_1/d ค่า d_1/d คงที่ ถ้าค่า d_2/d มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า K_{tgA} เพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่า d_1/d และค่า d_2/d มีค่าคงที่ ค่า K_{tgA} มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า S_1/d ที่เพิ่มขึ้น

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 2 มาสร้างกราฟ ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดรูช่วย d_1/d คงที่ ขนาดรูช่วย d_2/d มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า K_{tgA} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างรูหลักและรูช่วยเพิ่มขึ้น ค่า K_{tgA} มีแนวโน้มสูงขึ้น ค่า K_{tgA} ในรูปแบบ C นั้นสามารถลดลงได้สูงสุด 18.5 % เมื่อเทียบกับรูปแบบ A

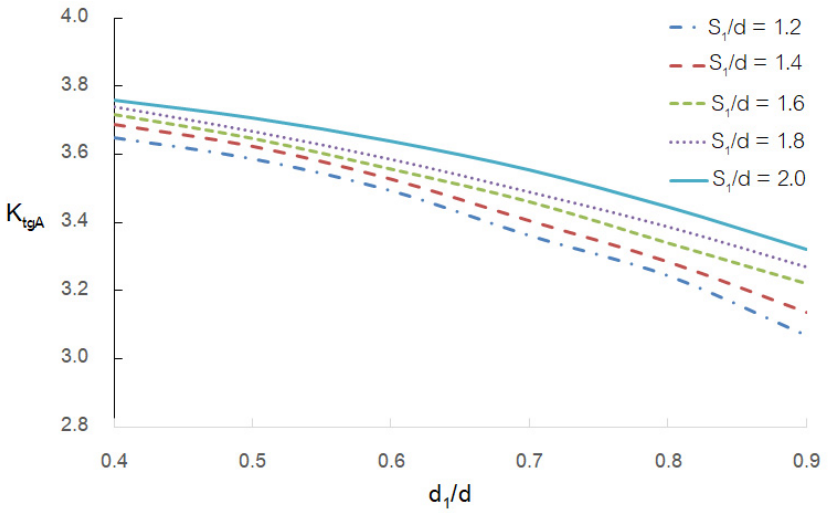


Figure 4 Effects of d_1/d on stress concentration factor at the edge A of the main hole in model B.

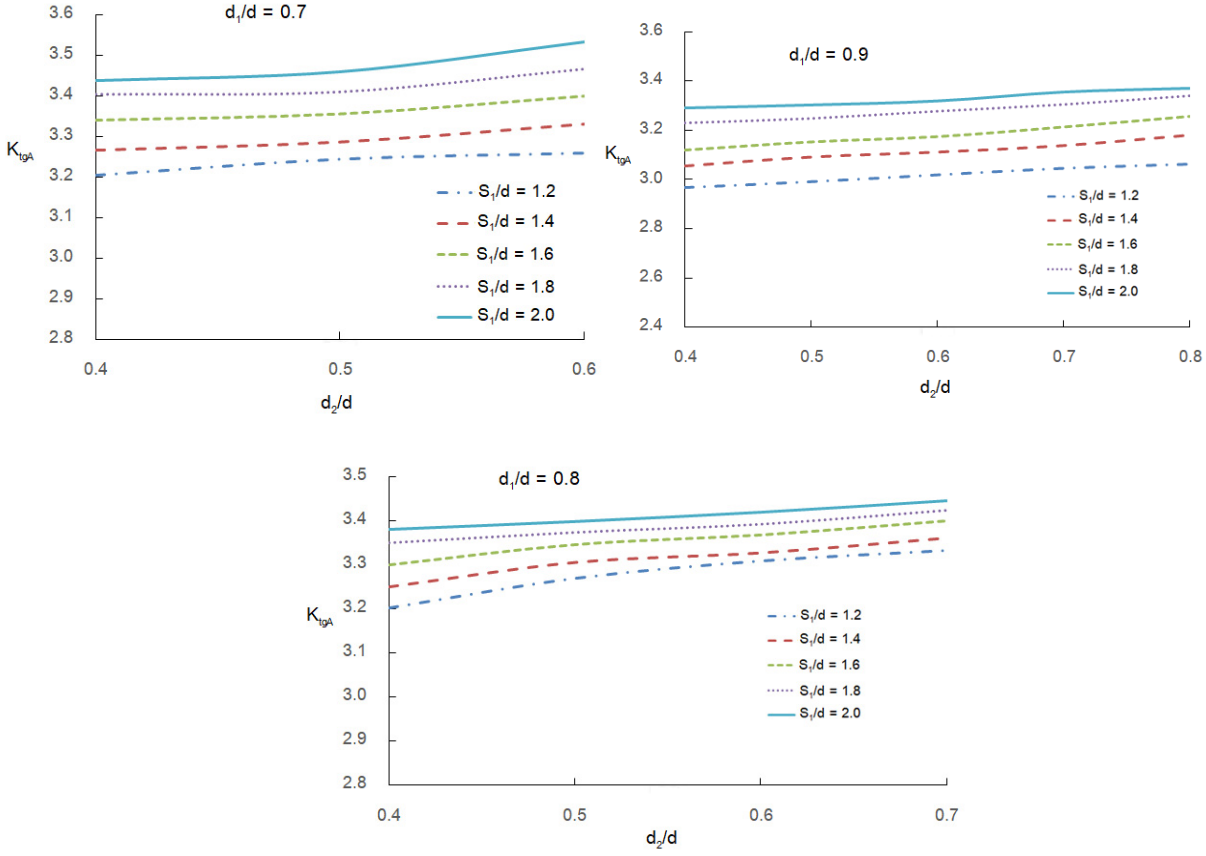


Figure 5 Stress concentration factor at the edge A of the main hole in Model C.

สรุป

วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่น ของชิ้นงานสี่เหลี่ยมที่มีรูกลมอยู่ตรงกลาง ภายใต้ภาระดึงตามแนวแกน การลดค่าความเค้นหนาแน่นโดยใช้รูช่วยสองรูใน Model B สามารถลดลงได้สูงสุด 15.7 % เทียบกับค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นใน Model A และรูช่วยสี่รูช่วยใน Model C สามารถลดลงได้สูงสุด 18.5 % เทียบกับค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นใน Model A โดยทั้ง

Model B และ Model C ได้วางรูช่วยก่อนและหลังของรูหลักทั้งสองด้านตามแนวยาวของชิ้นงาน เมื่อตัวประกอบความเค้นหนาแน่นลดลง หมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานลดลง แสดงว่าการกระจายของความเค้นในชิ้นงานราบเรียบขึ้น อายุการใช้งานของชิ้นงานย่อมมีค่ามากขึ้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

Mindlin, R. D. 1948. Stress distribution around a hole near the edge of a plate in tension, **Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis**. 5: 56-68

Erickson, P.E., and Riley, W.F. 1978. Minimizing stress concentrations around circular holes in uniaxially loaded plates. **Experimental Mechanics**. 97-100.

Meguid, S. A. 1986. Finite element analysis of defence hole system for the reduction of stress concentration factor in a uni-axially loaded plate with two coaxial holes. **Engineering fracture mechanics**. 25 (4): 403-413.

Meguid, S.A. and Gong, S.X. 1993. Stress concentration around interacting circular holes: A comparison between theory and experiments. **Engineering Fracture Mechanics**. 44(2): 247-256.

Ulrich, T.W. and Moslesh, F.A. 1995. A boundary element method for stress reduction by optimal auxiliary holes. **Engineering Analysis with Boundary Elements**. 15: 219-233.

Younis, N.T. 2006. Assembly stress for the reduction of stress concentration. **Mechanics Research Communications**. 33: 837-845.

Yang, Z., Kim, C.B., Beom, H.G. and Cho, C. 2010. The stress and strain concentrations of out-of-plane bending plate containing a circular hole. **International Journal of Mechanical Sciences**. 52: 836-846.

Sburlati, R. 2013. Stress concentration factor due to a functionally graded ring around a hole in an isotropic plate. **International Journal of Solids and Structures**. 50: 3649-3658

วัชระ เครือรัฐติกาล กรรมมันต์ ชูประเสริฐ และ ชาญเวช ศีลพิพัฒน์ 2015 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการ ทางไฟไนต์เอลิเมนต์สาหรับการลดความเค้นหนาแน่นของรูวงกลมเดียวภายใต้ภาระดึงโดยรูช่วย **ประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม** ครั้งที่ 10 หน้า 1155 - 1162 กรุงเทพฯ

วัชระ เครือรัฐติกาล กรรมมันต์ ชูประเสริฐ และ ชาญเวช ศีลพิพัฒน์ 2016 การลดความเค้นหนาแน่นของแผ่นสี่เหลี่ยมมีรูตรงกลางภายใต้แรงดึงตามแนวแกนโดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ **ประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์** ครั้งที่ 54 หน้า 437 - 445 กรุงเทพฯ

Aizhong, L., Ning, Z. and Guisen, Z., 2017. Minimizing stress concentrations around and elliptical hole by concentrated forces acting on the uniaxially loaded plate. **Acta Mechanical Solida Sinica**. 30: 318-326

Timoshenko, s., and Goodier, J.N., 1970. **Theory of Elasticity**. McGraw-Hill, New York.

ประสิทธิภาพของเทคนิคเพื่อปกป้องรอยต่อระหว่างคอนกรีตและวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

Effectiveness of Protective Techniques for Concrete/FRP Bond Joints

ปรมินทร์ เห็นชอบ[1*] และ จักรพันธ์ เทือกต๊ะ[1]

Poramin Hanchob[1*] and Chakrapan Tuakta[1]

บทคัดย่อ

แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างคอนกรีตและวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย หรือ FRP (Fiber-Reinforced Polymer Composite) มีความสำคัญมากในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล.) ที่มีการเสริมกำลังด้วย FRP เนื่องจากรอยต่อทำหน้าที่ถ่ายแรงจากคอนกรีตไปสู่ FRP ทำให้การเสริมกำลังมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมที่รุนแรงอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเสื่อมสภาพของพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและ FRP งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเทคนิคเพื่อปกป้องรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP จากการเสื่อมสภาพ 3 วิธี ได้แก่ การใช้มอร์ต้าฉาบปิดแผ่น FRP การใช้สารคู่ควบปรับสภาพผิวคอนกรีตก่อนการติดตั้ง FRP และการใช้สารเคลือบกันความชื้นปิดแผ่น FRP โดยศึกษาการเสื่อมสภาพในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ สภาวะความชื้นแบบต่อเนื่อง และสภาวะที่อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แบบต่อเนื่อง ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวนั้นใช้การทดสอบแบบแรงเฉือนแนวเดียว (Single-lap Shear Test) เพื่อหากำลังของแรงยึดเหนี่ยวในรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP จากผลการทดสอบพบว่าเทคนิคเพื่อปกป้องรอยต่อทั้ง 3 วิธีสามารถช่วยปกป้องรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP ได้อย่างมีประสิทธิภาพลดหลั่นกันไป

ABSTRACT

Concrete/FRP bond joint is important in reinforced concrete structure strengthened by FRP (Fiber-Reinforced Polymer Composite), as the bond joint transfers loads from concrete to FRP, resulting in efficient strengthening. In addition, previous studies have shown that use of FRP-strengthened structures in severe environment can cause degradation in concrete/FRP bond joint. Therefore, this research is aimed at studying the effectiveness of three protective techniques for concrete/FRP bond joint, namely i) mortar finish, ii) surface treatment by coupling agent, and iii) moisture-resistant protective coating. Durability tests were conducted on single-lap shear specimens exposed to varying severe environments, namely continuous moisture condition and continuous NaCl solution. Bond strength as affected by severe environment was obtained. The test results have shown that the protective techniques in consideration had varying degrees of effectiveness for concrete/FRP bond joint in severe environment.

Key Words :Bond Strength, Concrete/FRP Bond Joint, Severe Environment, Durability

*Corresponding author; e-mail address: Poramin_hc@outlook.co.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

โครงสร้างสาธารณูปโภคพื้นฐานที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล.) ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างอาคารหรือสะพาน เมื่ออายุการใช้งานมากขึ้นก็อาจมีการเสื่อมสภาพหรือความเสียหายเกิดขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงสร้างในการรับน้ำหนัก (Load Capacity) และการใช้งานได้ (Serviceability) ลดลงจากที่ได้มีการออกแบบไว้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน นอกจากนี้หากผู้ใช้งานโครงสร้างมีความต้องการเปลี่ยนแปลงหรือดัดแปลงรูปแบบและขนาดของน้ำหนักกระทำที่ใช้งานก็อาจทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องทำการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มกำลังให้แก่โครงสร้าง ในปัจจุบันการใช้วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหรือ FRP (Fiber-Reinforced Polymer Composite) ได้รับความนิยมมากยิ่งขึ้นเนื่องจากมีข้อดีหลายประการที่เหมาะสมสำหรับการเสริมกำลัง แต่อย่างไรก็ตามความคงทนของระบบ FRP ในระยะยาวมักจะถูกระบุว่าเป็นเหตุผลหลักในการเลือกใช้งานระบบ FRP ในความเป็นจริงโครงสร้างที่ได้รับการเสริมกำลังภายนอกด้วย FRP อาจจะมีการสัมผัสสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงต่างๆตามลักษณะของภูมิอากาศรอบๆโครงสร้างนั้นๆ ซึ่งอาจมีผลให้ความคงทนของระบบ FRP ลดลง ผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายนอกสามารถทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและ FRP ลดลงได้ และเป็นต้นเหตุให้ FRP หลุดลอกจากคอนกรีตก่อนกำหนด

งานวิจัยนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพของเทคนิคเพื่อปกป้องรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP ซึ่งในการติดตั้งแผ่น FRP กับคอนกรีตนั้น ได้มีการนำเทคนิคต่างๆ มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ FRP โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคนิคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเหนี่ยว 3 วิธีการ ได้แก่ การใช้มอร์ต้าฉาบปิดแผ่น FRP เมื่อติดตั้ง FRP เรียบร้อยแล้ว การปรับสภาพผิวคอนกรีตด้วยสารคู่ควบประเภทไซเลนก่อนการติดตั้ง FRP และการใช้สารเคลือบกันความชื้นเมื่อติดตั้ง FRP เรียบร้อยแล้ว ส่วนสภาวะแวดล้อมที่ศึกษามี 3 สภาวะ ได้แก่ สภาวะความชื้นแบบต่อเนื่อง สภาวะที่อยู่ในสารละลาย NaCl แบบต่อเนื่อง และสภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวนั้นใช้การทดสอบแบบ Single-lap Shear ในการหาแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP

การทดสอบเพื่อหาแรงยึดเหนี่ยวจะใช้คอนกรีตทรงปริซึมที่มีการติดตั้ง FRP ทำการทดสอบด้วยการยึดก้อนคอนกรีตไว้กับที่ไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง โดยใช้ Linear Variable Displacement Transformer (LVDT) วัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของแผ่นเหล็กที่ใช้ยึดคอนกรีต เพื่อดูว่ามีการเคลื่อนที่หรือไม่ และใช้ปากจับ (Grip) ที่สามารถจับแผ่น FRP เพื่อดึง FRP ในทิศทางขนานกับความยาวของก้อนคอนกรีต (Figure 1) โดยใช้อัตราเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

หล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร เพื่อนำมาทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่มีเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมและระยะเวลาเดียวกับตัวอย่างทดสอบแบบ Single-lap Shear โดยมีอัตราเร็วในการกด 1 มิลลิเมตรต่อนาทีตามมาตรฐาน ASTM C33

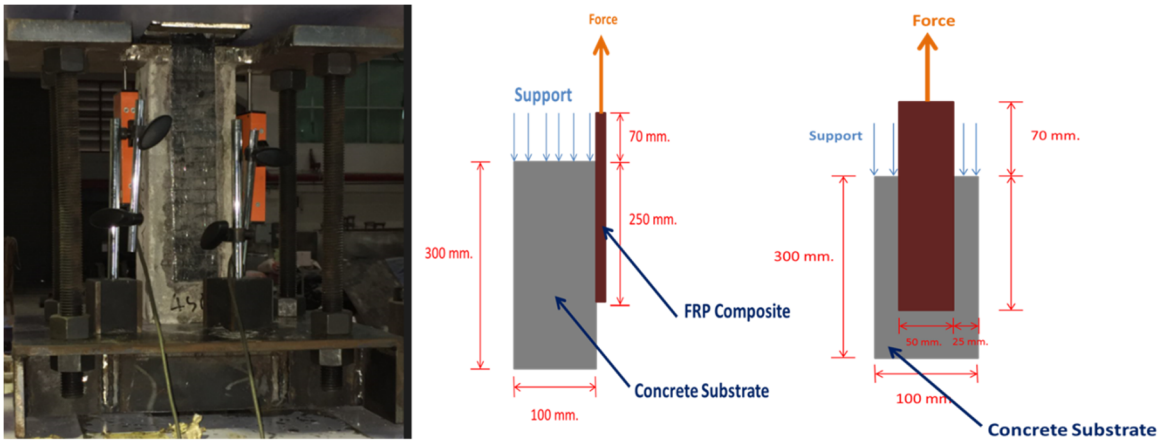


Figure 1 Single-lap shear test models

การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงของอีพ็อกซี่

ทดสอบพฤติกรรมภายใต้แรงดึงของตัวอย่างอีพ็อกซี่รูปทรงกระดูกสุนัข (Dog Bone) โดยที่ตัวอย่างมีเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมและระยะเวลาเดียวกับตัวอย่างทดสอบแบบ Single-lap Shear ทำการทดสอบด้วยอัตราเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาทีตามมาตรฐาน ASTM D638 และติดตั้งสเตนเกจ (Strain Gauge) 1 ตัว ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างสำหรับวัดค่าความเครียดที่ตำแหน่งนั้น เพื่อใช้ในการคำนวณค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอีพ็อกซี่

สภาวะแวดล้อมที่ใช้ศึกษา

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ทั้งตัวอย่างทดสอบแบบ Single-lap Shear ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก และตัวอย่างอีพ็อกซี่ ได้รับการบ่มในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง คือ สภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นแบบต่อเนื่อง (Continuous Moisture Condition) เป็นสภาวะที่ตัวอย่างถูกแช่น้ำไว้ต่อเนื่อง โดยแบ่งสภาวะนี้ออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ 8 สัปดาห์ และ 16 สัปดาห์ และสภาวะแวดล้อมที่เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์แบบต่อเนื่อง (Continuous NaCl Solution Condition) เป็นสภาวะที่ตัวอย่างถูกแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.5% โดยน้ำหนักแบบต่อเนื่อง โดยแบ่งสภาวะนี้ออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ 8 สัปดาห์ และ 16 สัปดาห์ เช่นกัน รวมถึงสภาวะแวดล้อมควบคุม (Control Condition) เป็นสภาวะที่เก็บตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ

เทคนิคเพื่อปกป้องรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP

เทคนิคที่ใช้เพื่อปกป้องรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP สำหรับงานวิจัยนี้มี 3 เทคนิคและกำหนดเป็นเทคนิคที่ 1 เทคนิคที่ 2 และเทคนิคที่ 3 ตามลำดับ ได้แก่ เทคนิคที่ 1 คือการฉาบปิด FRP ด้วยมอร์ต้าหลังจากติดตั้ง FRP เรียบร้อยแล้ว (Figure 2a) เทคนิคที่ 2 คือการทาปิด FRP ด้วยสารเคลือบกันความชื้นหลังจากติดตั้ง FRP เรียบร้อยแล้ว (Figure 2a) และเทคนิคที่ 3 คือการปรับสภาพผิวคอนกรีตด้วยสารคู่ควบประเภทไซเลนก่อนติดตั้ง FRP (Figure 2b) โดยใช้สารละลายของสารคู่ควบไซเลน 1% โดยน้ำหนัก ทาที่ผิวของคอนกรีตหลังจากนั้นนำคอนกรีตไปอบที่อุณหภูมิ 100°C และเมื่อคอนกรีตมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องก็สามารถติดตั้ง FRP ได้

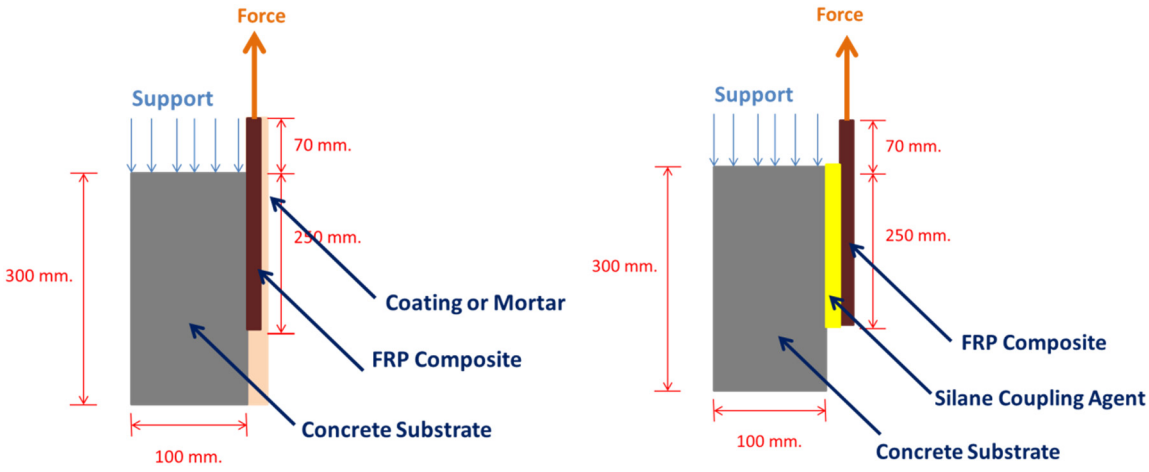


Figure 2 (a) Schematic representation of mortar finish or moisture-resistant protective coating technique (b) Schematic representation of surface treatment by coupling agent technique

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงต่อคุณสมบัติทางกลของอีพ็อกซี่

Table 1 แสดงค่าเฉลี่ยคุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างอีพ็อกซี่ 3 ตัวอย่างในแต่ละเงื่อนไขสภาวะแวดล้อม พบว่าคุณสมบัติทางกลของอีพ็อกซี่มีค่าลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นแบบต่อเนื่องและสารละลาย NaCl แบบต่อเนื่อง เนื่องจากน้ำสามารถซึมเข้าไปในอีพ็อกซี่ได้ โดยแบ่งชนิดของน้ำดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดแรก คือ น้ำที่ทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างห่วงโซ่ (Inter-chain Van der Waals) ให้อ่อนแอลง และทำหน้าที่เป็น Plasticizer รวมถึงทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนแก้วลดลง (Glass Transition Temperature) ส่วนน้ำชนิดที่สอง คือ โมเลกุลของน้ำที่สร้างพันธะไฮโดรเจนกับโครงข่ายเรซิน โดยปริมาณน้ำชนิดที่สองยากที่กำจัดออกไปและเป็นตัวการที่ทำให้วัสดุไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพปกติได้ และจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในอุณหภูมิที่สูงขึ้นในเวลาที่นานขึ้น (Zhou and Lucas, 1999)

Table 1 Summary of the properties in epoxy specimens.

Specimen	Environment	Exposure Duration (Weeks)	Maximum Stress (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	Yield Strength (MPa)	Percentage of Increase Weight
EC	Control	0	13.23	459.93	7.42	0.00
2WE	Immersion in water	8	10.96	147.58	2.81	0.50
4WE	Immersion in water	16	9.60	123.30	2.22	1.09
2SE	Immersion in NaCl	8	13.23	305.26	4.27	0.58
4SE	Immersion in NaCl	16	8.07	156.62	2.84	1.28

ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงต่อกำลังต้านทานแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีต

จาก Figure 3 แสดงให้เห็นว่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต (f_c') เมื่อถูกบ่มในสภาวะแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก Dicalcium silicate ($2CaO.SiO_2$ หรือ C_2S) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในซีเมนต์ที่สามารถทำปฏิกิริยาน้ำในสภาวะแวดล้อมทั้ง 2 ชนิด แล้วทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นหลังจากคอนกรีตมีอายุมากกว่า 28 วัน

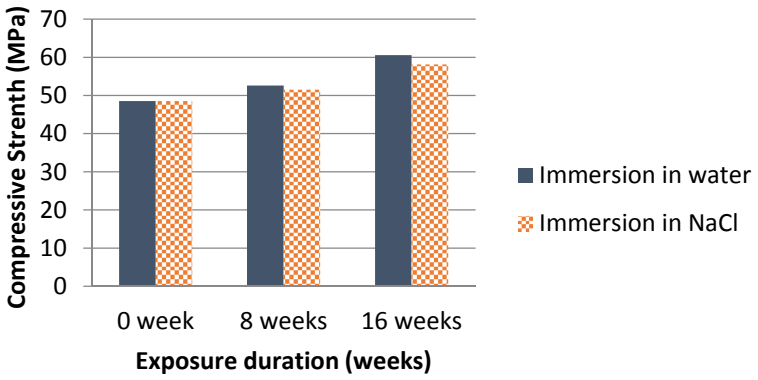


Figure 3 Compressive strength of concrete

ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงต่อแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP

จาก Figure 4 แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างที่ไม่ใช้เทคนิคปกป้องรอยต่อ (ตัวอย่างควบคุม) หลังจากอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นแบบต่อเนื่องในช่วงเวลา 8 สัปดาห์แรกมีค่าลดลงประมาณ 7.24% ของตัวอย่างในสภาวะควบคุม แต่เมื่อตัวอย่างดังกล่าวอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์ แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อกลับสูงขึ้นประมาณ 15.10% ของตัวอย่างในสภาวะควบคุม ทั้งนี้อาจจะเกิดจากในช่วง 8 สัปดาห์แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการบวมตัวของอีพ็อกซี่ที่มีน้ำซึมเข้าไปทำให้คุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป และกำลังของคอนกรีตไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 8 สัปดาห์แรก แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป 16 สัปดาห์กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทำให้แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP สูงขึ้นตามไปด้วย (ดู Figure 3 ประกอบ)

ส่วนตัวอย่างควบคุมที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นสารละลาย NaCl แบบต่อเนื่องที่เวลา 8 สัปดาห์แรกพบว่าแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อลดลงเพียง 2.52% ของตัวอย่างในสภาวะควบคุม สาเหตุที่แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีค่าลดลงอาจเกิดจากสาเหตุเดียวกับความชื้นต่อเนื่อง หรืออาจเกิดจากที่รอยต่อระหว่างคอนกรีตและเรซินมีผลึกรูปเข็มที่มีส่วนประกอบหลักเป็นโซเดียมคาร์บอเนต (Al-Mahmoud et al., 2014) แต่เมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นสารละลาย NaCl ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์ แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อกลับสูงขึ้นประมาณ 14.31% ของตัวอย่างในสภาวะควบคุม ซึ่งน่าจะมีสาเหตุเดียวกับกรณีความชื้นแบบต่อเนื่อง

รูปแบบการเสียหายของรอยต่อจากสภาวะแวดล้อมทั้งสองแบบนี้สามารถเกิดได้จาก 3 กระบวนการ คือ การแพร่ของน้ำไปตามช่องว่างระหว่างโครงข่ายของเรซิน การแพร่ของน้ำไปตามรอยร้าวระดับจุลภาค (micro-cracks) ของคอนกรีต และรอยร้าวที่รอยต่อระหว่างคอนกรีตและเรซิน แต่จากการทดสอบ Single-lap Shear ตัวอย่างที่ไม่มีเทคนิคปกป้องรอยต่อในงานวิจัยนี้พบว่าแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อยังไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างมีนัยสำคัญ

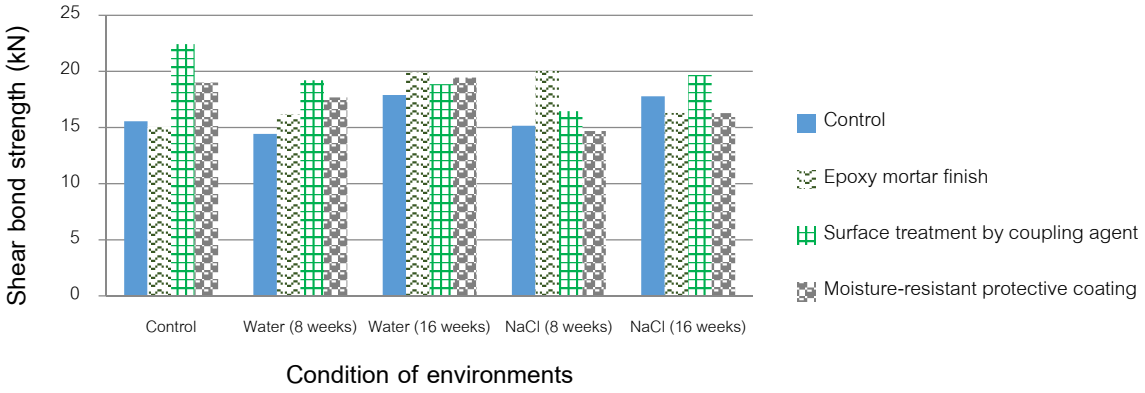


Figure 4 Summary of shear bond strength.

ประสิทธิภาพของเทคนิคปกป้องรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP ในสภาวะแวดล้อมควบคุม

จาก Figure 4 เทคนิคที่ 1 ไม่ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อเปลี่ยนแปลงไปจากแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างควบคุม เนื่องจากมอร์ต้ามีกำลังต้านทานแรงดึงน้อยมาก ส่วนเทคนิคที่ 2 สามารถทำให้แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีค่าสูงขึ้นถึงประมาณ 44.21% ของแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างควบคุม เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนเป็นตัวที่ช่วยปรับปรุงพื้นผิวของคอนกรีต โดยทำให้การเชื่อมประสานระหว่างคอนกรีตและอีพ็อกซี่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (เสกสรร หัสดี และ นฤดล จงใจหาญ, 2557) เทคนิคที่ 3 สามารถทำให้แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 22.19% ของแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างควบคุม อาจจะเกิดขึ้นจากสารเคลือบเป็นสาร Polyurethane ที่มีความเหนียวมาก และตามเอกสารจากผู้ผลิตสารเคลือบมีกำลังต้านทานแรงดึงสูงถึง 6 MPa ซึ่งส่งผลทางอ้อมให้แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีค่าสูงขึ้นจากตัวอย่างควบคุม ดังนั้นจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่สภาวะแวดล้อมทั่วไปเทคนิคที่ 2 สามารถช่วยให้แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีกำลังเพิ่มขึ้นมากที่สุดและเหมาะสมกับการใช้งานให้สภาวะนี้มากที่สุด ส่วนการเทคนิคที่ 1 ไม่ส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อเลย

ประสิทธิภาพของเทคนิคปกป้องรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นแบบต่อเนื่อง

จาก Figure 4 ตัวอย่างที่ใช้เทคนิคที่ 1 หลังจากอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 8 สัปดาห์ และ 16 สัปดาห์ พบว่ามีแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมากกว่าแรงเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างควบคุมที่มีเงื่อนไขเดียวกันประมาณ 11.98% และ 11.14% ตามลำดับ ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากมอร์ต้าสามารถป้องกันไม่ให้น้ำเข้าไปในรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP ได้ ส่วนตัวอย่างที่ใช้เทคนิคที่ 2 พบว่าแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างควบคุมที่มีเงื่อนไขเดียวกันประมาณ 33.13% และ 5.39% เมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะแวดล้อม 8 สัปดาห์ และ 16 สัปดาห์ ตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะเกิดจากสารคู่ควบไซเลนที่ทำให้พื้นผิวของคอนกรีตมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) และช่วยทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและอีพ็อกซี่แข็งแรงขึ้น อย่างไรก็ตามความชื้นก็ยังสามารถซึมเข้าไปในอีพ็อกซี่ได้เรื่อยๆ ทำให้อีพ็อกซี่มีการบวมตัวและคุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป (Amidi and Wang, 2016) และสำหรับตัวอย่างที่ใช้เทคนิคที่ 3 พบว่าแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างควบคุมที่มีเงื่อนไขเดียวกันประมาณ 22.61% และ 8.63% เมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะแวดล้อม 8 สัปดาห์ และ 16 สัปดาห์ ตามลำดับ เนื่องจากสารเคลือบถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับการสัมผัสความชื้นเป็นเวลาไม่นาน จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าเทคนิคที่ 2 และ 3 นั้นมีประสิทธิภาพในช่วง 8 สัปดาห์แรก จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นแบบเปียกสลับแห้งในระยะเวลาสั้นๆ แต่ถ้าเป็นสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นต่อเนื่องเทคนิคที่ 1 จะมีประสิทธิภาพดีที่สุด

ประสิทธิภาพของเทคนิคปกป้องรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นสารละลาย NaCl แบบต่อเนื่อง

จาก Figure 4 ตัวอย่างที่ใช้เทคนิคที่ 1 หลังจากอยู่สภาวะแวดล้อมที่เป็นสารละลาย NaCl แบบต่อเนื่องในช่วง 8 สัปดาห์แรก พบว่าแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างควบคุมที่มีเงื่อนไขเดียวกันประมาณ 32.14% แต่เมื่อตัวอย่างถูกบ่มเป็นเวลานาน 16 สัปดาห์ แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างที่ใช้เทคนิคที่ 1 กลับมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมที่มีเงื่อนไขเดียวกัน จากการสังเกตพบว่าหลังจากตัวอย่างถูกบ่มในสารละลาย จะมีเกลือสีขาวมาเกาะที่ผิวของมอร์ต้าในปริมาณมาก ซึ่งอาจจะเกิดจากสารละลายพยายามแพร่เข้าไปในมอร์ต้าและรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP เนื่องจากมอร์ต้าและรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP มีความเข้มข้นของเกลือน้อยกว่าในสารละลาย ซึ่งจากสาเหตุนี้อาจจะเป็นไปได้ว่าในช่วง 8 สัปดาห์แรกมอร์ต้าสามารถป้องกันการซึมของสารละลายเข้าไปในรอยต่อได้ แต่เมื่อตัวอย่างอยู่ในสารละลายนานขึ้นเกลือที่พยายามซึมเข้าไปในมอร์ต้ารวมตัวเป็นผลึกที่ใหญ่ขึ้นตรงบริเวณช่องว่างของมอร์ต้าอาจจะส่งผลให้มอร์ต้าเกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นทำให้สารละลายสามารถเข้าไปในรอยต่อระหว่างคอนกรีตและ FRP

เพิ่มขึ้น ประกอบกับคอนกรีตตรงรอยต่อในตัวอย่างควบคุมมีการสัมผัสกับสารละลายมากกว่าคอนกรีตที่รอยต่อในตัวอย่างที่ใช้เทคนิคที่ 1 ทำให้กำลังคอนกรีตของตัวอย่างควบคุมสูงกว่ากำลังคอนกรีตของตัวอย่างที่ใช้เทคนิคที่ 1 ส่วนตัวอย่างที่ใช้เทคนิคที่ 2 พบว่าแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างควบคุมที่มีเงื่อนไขเดียวกันประมาณ 8.58% และ 36.25% เมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะแวดล้อม 8 สัปดาห์ และ 16 สัปดาห์ ตามลำดับ ซึ่งอาจจะเกิดจากสารคู่ควบไซเลนสามารถป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตกร้าวที่รอยต่อระหว่างคอนกรีตและอีพ็อกซี่ได้ อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถเกิดรอยร้าวระดับจุลภาค (micro-cracks) ได้ (Amidi and Wang, 2016) และตัวอย่างที่ใช้เทคนิคที่ 3 หลังจากอยู่ในสารละลายเป็นเวลา 8 สัปดาห์ และ 16 สัปดาห์ แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีค่าใกล้เคียงกับแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อในตัวอย่างควบคุมที่มีเงื่อนไขเดียวกัน ทั้งนี้สารละลาย NaCl ทำให้คุณสมบัติทางกลของสารเคลือบเสื่อมสภาพไป (Krause and Kyle, 2017) จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าเทคนิคที่ 1 และเทคนิคที่ 2 มีประสิทธิภาพให้ช่วง 8 สัปดาห์แรก แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเทคนิคที่ 2 มีประสิทธิภาพดีที่สุด ทำให้เทคนิคที่ 1 เหมาะสมสำหรับสภาวะที่ต้องสัมผัสกับสารละลาย NaCl ในระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น สำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่เป็นสารละลาย NaCl แบบต่อเนื่องเทคนิคที่ 2 จะมีความเหมาะสมที่สุด

สรุป

ที่สภาวะแวดล้อมควบคุมเทคนิคการปรับสภาพผิวคอนกรีตด้วยสารคู่ควบประเภทไซเลนก่อนติดตั้ง FRP สามารถทำให้แรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นแบบต่อเนื่องเทคนิคการปรับสภาพผิวคอนกรีตด้วยสารคู่ควบประเภทไซเลนก่อนติดตั้ง FRP และเทคนิคการทาสารเคลือบกันความชื้นปิดแผ่น FRP เมื่อติดตั้ง FRP เรียบร้อยแล้ว มีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับในช่วง 8 สัปดาห์แรก แต่เมื่อผ่านไป 16 สัปดาห์การใช้มอร์ต้าฉาบปิดแผ่น FRP เมื่อติดตั้ง FRP เรียบร้อยแล้ว มีประสิทธิภาพมากที่สุด และในสภาวะแวดล้อมที่เป็นสารละลาย NaCl แบบต่อเนื่อง เทคนิคการใช้มอร์ต้าฉาบปิดแผ่น FRP เมื่อติดตั้ง FRP เรียบร้อยแล้ว มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับในช่วง 8 สัปดาห์แรก แต่ที่ 16 สัปดาห์การปรับสภาพผิวคอนกรีตด้วยสารคู่ควบประเภทไซเลนก่อนติดตั้ง FRP มีประสิทธิภาพดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัย และพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

หัสดี เสกสรรค์ และ จงใจหาญ นฤดล .2557. **การศึกษาสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยา**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

American Society for Testing and Materials. 2010. **Standard Test method for Tensile Properties of Plastics**. D638-01.

American Society of Testing Materials. 2012. **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. C39.

F. Al-Mahmoud, J. Mechling and M. Shaban. 2014. Bond strength of different strengthening Systems–Concrete elements under freeze–thaw cycles and salt water immersion exposure. **Construction and Building Materials**. 70 399–409.

Krause and Kyle. 2017. Role of Salt on Coating Failure. **Honors Research Projects**. 514. http://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/514

S. Amidi and J.Wang.2016. Subcritical debonding of FRP-to-concrete bonded interface under synergistic effect of load, moisture, and temperature. 2016. **Mechanics of Materials**. 92 80–93.

Zhou, J. and Lucas, JP.1999. Hygrothermal effects of epoxy resin. Part I: the nature of water in epoxy. **Polym Guildf**. 40:5505e12.

ผลกระทบจากเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำสะกอมต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง

Impacts of Jetty on Shoreline Change around Sakom River Mouth

รัฐพล รุ่งโรจน์เจริญผล[1*] และ สมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง[1]

Rattapol Rungrodcharoenpol[1*] and Sompratana Ritphring[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบจากเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง ในการศึกษานี้วิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งและการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่ง โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศในปี พ.ศ. 2517, 2529, 2538 และ 2545 และภาพถ่ายดาวเทียมในปี พ.ศ.2549, 2554, 2556 และ 2558 มาทำการตรึงพิกัดด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ นำมาซ้อนทับกัน ลากเส้นแนวชายฝั่ง แล้วทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งด้านตะวันตก พบว่า ก่อนการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งโดยรวมเป็นแบบทับถม หลังการก่อสร้าง มีการเปลี่ยนแปลงจากการทับถมเป็นการกัดเซาะ โดยมีระยะการกัดเซาะและพื้นที่กัดเซาะสูงสุดบริเวณเขื่อนกันคลื่นตัวสุดท้ายถึงบ้านโคกสัก-บ่อโชน เมื่อมีโครงสร้างมีระยะการกัดเซาะสูงสุดเท่ากับ -112.12 ม. และมีพื้นที่การกัดเซาะสูงสุดเท่ากับ -164,949.14 ตร.ม. เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งด้านตะวันออก พบว่า ก่อนและหลังการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบทับถมเช่นเดิม โดยมีระยะการทับถมและพื้นที่ทับถมสูงสุดบริเวณด้านตะวันออกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ ถึงบ้านปากบาง เมื่อมีโครงสร้างมีระยะการทับถมสูงสุดเท่ากับ +327.89 ม. และมีพื้นที่การทับถมสูงสุดเท่ากับ +142,559.13 ตร.ม.

ABSTRACT

The study on impact of jetty on shoreline change around Sakom river mouth is based on shoreline change and area change analyses using aerial photos in 2517, 2529, 2538, 2545 and satellite images in 2549, 2554, 2556 and 2558 processed by GIS and overlay technique. Shoreline were digitized and analyzed the impacts of coastal structures around river mouth. The overall result showed the deposit trend before the construction along the west of river mouth. After the construction the maximum shoreline erosion of -112.12 m. with the maximum area change of 164,949.14 sq.m. can be found at Ban Khoksak-Bochon where is located beyond the end of breakwater. On the other hand, shoreline change along the east of river mouth showed that before and after construction the maximum shoreline deposition of +327.89 m. with the maximum area change of +142,559.13 sq.m. can be found at Ban Pak-Bang where is located east side of jetty.

Key Words: Shoreline Change, Sakom River Mouth, Jetty, Breakwater, GIS

*Corresponding author; e-mail address: rattapol.r@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การก่อสร้างโครงสร้างชายฝั่งนั้น โครงสร้างแต่ละประเภทมีวัตถุประสงค์ตลอดจนข้อดีข้อจำกัดแตกต่างกันไป เขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ (jetty) ช่วยรักษาสภาพปากแม่น้ำให้มีเสถียรภาพ ช่วยให้ตะกอนในแม่น้ำไม่ตกตะกอนบริเวณปากแม่น้ำ ซึ่งอาจทำให้ปากแม่น้ำตื้นเขิน และเป็นอุปสรรคต่อการสัญจรทางเรือได้ แต่การก่อสร้างโครงสร้างนี้บริเวณปากแม่น้ำจะส่งผลกระทบให้ชายหาดด้านท้ายน้ำ (downdrift) เกิดการกัดเซาะอย่างรุนแรง และเกิดการทับถมในพื้นที่ด้านเหนือน้ำ(updrift) ส่วนเขื่อนกันคลื่น (breakwater) เป็นโครงสร้างช่วยลดพลังงานคลื่นที่จะเคลื่อนเข้าสู่ชายฝั่ง ช่วยให้เกิดพื้นที่อับคลื่น หรือพื้นที่สงบด้านหลังโครงสร้าง ส่งผลให้เกิดการทับถมบริเวณด้านหลังของโครงสร้าง แต่ส่งผลกระทบทำให้เกิดการกัดเซาะบริเวณช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น

การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกพื้นที่ศึกษาบริเวณปากร่องน้ำสะกอม ต.สะกอม อ.เทพา จ.สงขลา ซึ่งช่วงก่อน พ.ศ.2541 ชาวประมงประสบปัญหาเรือไม่สามารถเข้าออกได้ เนื่องจากมีตะกอนทรายตกบริเวณปากแม่น้ำ กรมเจ้าท่า จึงได้ก่อสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ และเขื่อนกันคลื่น แล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2541 หลังจากการก่อสร้าง บริเวณเขื่อนกันคลื่นตัวสุดท้ายพบปัญหาการกัดเซาะรุนแรงปานกลาง โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง 1-5 เมตร/ปี (สิน สินสกุล และคณะ, 2545) ผู้วิจัยจึงโดยมีแนวคิดหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งก่อนและหลังการก่อสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำว่าส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งอย่างไร และแนวโน้มที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตของชายฝั่งบริเวณปากร่องน้ำสะกอมและพื้นที่ศึกษาข้างเคียง เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการหามาตรการการเยียวยา แก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยผู้วิจัยจะนำข้อมูลการศึกษาครั้งนี้ เป็นประวัติการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งของการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณปากร่องน้ำ เพื่อการวิเคราะห์เชิงลึกต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาอยู่บริเวณปากร่องน้ำสะกอม ต.สะกอม อ.เทพา จ.สงขลา โดยมีโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ (jetty) จำนวน 2 ตัว ด้านตะวันออกยาว 620 ม. ด้านตะวันตกยาว 606 ม.และเขื่อนกันคลื่น (breakwater) จำนวน 4 ตัว แต่ละตัวยาว 50 เมตร แล้วเสร็จเมื่อปี พ.ศ.2541 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาด้านทิศตะวันตกครอบคลุมจากเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำด้านตะวันตก, บ้านโคกสัก-บ่อโชน ไปจนถึงบ้านตลิ่งชัน สำหรับด้านตะวันออก ครอบคลุมบริเวณเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำด้านตะวันออก, บ้านปากบาง ไปจนถึงบ้านหัวเขา (Figure1)

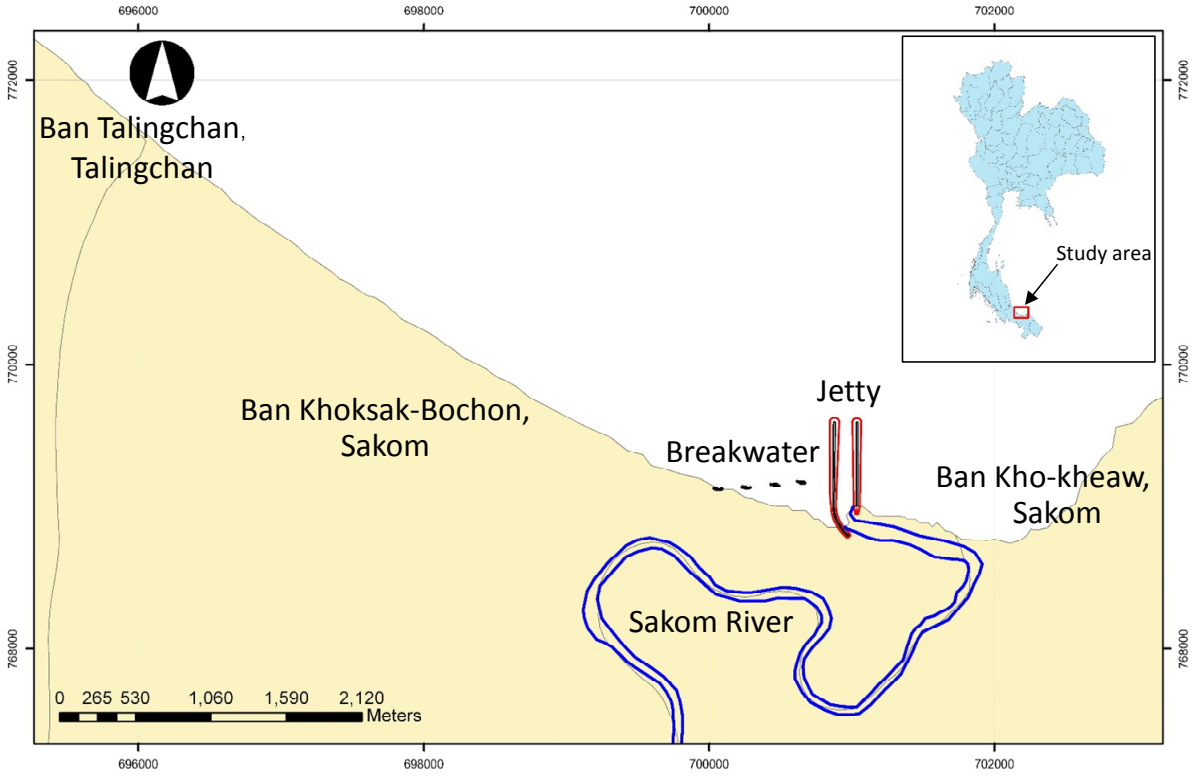


Figure 1 Sakom river mouth

บริเวณพื้นที่ศึกษานั้นได้รับผลกระทบโดยตรงจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งเกิดในช่วงประมาณเดือนตุลาคม ถึงเดือนกุมภาพันธ์ของทุกปี ส่งผลให้เกิดฝนตก, ลมแรง, คลื่นสูง และมักพบเห็นการกัดเซาะชายฝั่งช่วงเวลานี้ สำหรับการเคลื่อนตัวของตะกอนเลียบฝั่ง (longshore sediment transport) จะมีทิศทางการเคลื่อนตัวสุทธิจากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2557)

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้รวบรวมข้อมูลจากภาพถ่ายทางอากาศ จากกรมแผนที่ทหาร และแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ GeoEye-1 จาก Google earth ครอบคลุมบริเวณชายฝั่งทั้งด้านตะวันตกและด้านตะวันออกของปากร่องน้ำสะกอม โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศจากกรมแผนที่ทหารมาตราส่วน 1:15,000 ได้แก่ ปี พ.ศ.2517, 2529, 2538, 2545 และภาพถ่ายดาวเทียม GeoEye-1 จาก Google earth ได้แก่ ปี พ.ศ. 2549, 2554, 2556 และ 2558

วิธีการศึกษา

นำข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและภาพถ่ายดาวเทียมมาทำการตรึงภาพพิกัดด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ให้อยู่ในระบบ UTM WGS-84 Zone47N จากนั้นทำการลากแนวชายฝั่ง (shoreline) ซึ่งแสดงขอบเขตระหว่างพื้นดินและพื้นน้ำ แนวชายฝั่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง คลื่น ลม ดังนั้นในทางปฏิบัติการกำหนดแนวชายฝั่ง จึงจำเป็นต้องใช้ตัวบ่งชี้เส้นชายฝั่ง (shoreline indicator) โดยจะใช้ในการหาตำแหน่งแนวชายฝั่งที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ ซึ่งตัวบ่งชี้แนวชายฝั่งมีด้วยกันหลายแบบ การศึกษานี้ได้ทำการ

วิเคราะห์แนวชายฝั่ง โดยการ digitized แนวชายฝั่งทะเลด้วยวิธีการแปลความหมายด้วยสายตา (visual interpretation) ซึ่งกำหนดขอบเขตชายฝั่งจากแนวของต้นไม้ หรือพืชพันธุ์บริเวณสันทราย (seaward dune vegetation line) เป็นเกณฑ์การพิจารณาแนวชายฝั่ง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์หาพื้นที่การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในปีต่างๆ แล้วนำมาซ้อนทับกัน (overlay) (Elizabeth H. Boak and Ian L. Turner, 2005), (สุรเชษฐ์ รวมธรรม และคณะ, 2555) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตลอดจน วิเคราะห์หาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อชายฝั่งของพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งด้านตะวันตกและด้านตะวันออกของปากร่องน้ำสะกอม

การวิเคราะห์พื้นที่ด้านตะวันตกของปากร่องน้ำสะกอมช่วงก่อนและหลังการก่อสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ และเขื่อนกันคลื่น ว่ามีแนวโน้มและความสัมพันธ์จากผลกระทบของโครงสร้างอย่างไร สำหรับด้านตะวันตกจะแบ่งการพิจารณา เป็น 2 รูปแบบ คือ ผลการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสะสมตั้งแต่เขื่อนปากร่องน้ำ ไปจนถึงบ้านตลิ่งชัน และบริเวณเขื่อนกันคลื่นตัวสุดท้าย ถึงบ้านตลิ่งชัน เพื่อศึกษาแนวโน้มโดยรวมที่มีผลมาจากเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ และเขื่อนกันคลื่นนั้นส่งผลกระทบต่อชายฝั่งด้านตะวันตกอย่างไร และผลกระทบของเขื่อนกันคลื่นนั้นส่งผลกระทบต่อชายฝั่งด้านตะวันตกอย่างไร โครงสร้างป้องกันชายฝั่งใดที่มีผลกระทบต่อชายฝั่งอย่างมีนัยสำคัญมากกว่ากัน

ในส่วนของการวิเคราะห์พื้นที่ด้านตะวันออกของปากร่องน้ำสะกอม ได้แบ่งเป็นการวิเคราะห์ช่วงก่อนและหลังการก่อสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ และเขื่อนกันคลื่นว่ามีแนวโน้มและความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งอย่างไร

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่ง

จากการวิเคราะห์แนวชายฝั่งช่วงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517 ถึง พ.ศ. 2558 โดยพิจารณาจากแนวชายฝั่งที่ช่วงเวลาต่างๆ และหาระยะชายฝั่งที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งในกรณีก่อนการก่อสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ คือ พ.ศ.2517 ถึง พ.ศ.2538 และ หลังการก่อสร้าง คือ พ.ศ. 2545-2558 โดยใช้แนวชายฝั่ง พ.ศ.2517เป็นแนวชายฝั่งอ้างอิง พบว่า บริเวณด้านตะวันตกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ ถึง เขื่อนกันคลื่นตัวสุดท้าย (W+0.00 ถึง W+0.83) ก่อนการก่อสร้าง มีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบทับถม โดยมีระยะการทับถมสูงสุด เมื่อ พ.ศ.2538 เท่ากับ +132.32 ม. เมื่อมีการก่อสร้างพบว่า บริเวณนี้มีการทับถมสลับการกัดเซาะ โดยมีระยะการทับถมสูงสุดเท่ากับ 2+49.28 ม. และมีระยะการกัดเซาะสูงสุดเท่ากับ -15.17 ม. ในปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2549 ตามลำดับ

ช่วงเขื่อนกันคลื่นตัวสุดท้าย ถึงบ้านโคกสัก-บ่อโชน (W+0.83 ถึง W+4.88) ก่อนการก่อสร้าง มีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบทับถมสลับการกัดเซาะ โดยมีระยะการทับถมสูงสุดเท่ากับ +55.32 ม.ในปี พ.ศ.2538 และมีระยะการกัดเซาะสูงสุด เท่ากับ -2.71 ม. ในปี พ.ศ. 2529 และเมื่อมีการก่อสร้างพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบกัดเซาะ มีระยะการทับถมบ้างส่วน โดยมีระยะการกัดเซาะสูงสุดในปีพ.ศ. 2558 เท่ากับ -112.12 ม.

ช่วงบ้านตลิ่งชัน (W+4.88 ถึง W+5.60) นั้น ทั้งก่อนและหลังการก่อสร้างนั้นมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบทับถมสลับการกัดเซาะ โดยมีระยะการทับถม เท่ากับ +19.83 ม. และมีระยะการกัดเซาะเท่ากับ -12.16 ม. ในปีพ.ศ.2538 และพ.ศ.2558 ตามลำดับ

สำหรับชายฝั่งด้านตะวันออกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำถึงบ้านปากบาง (E+0.00 ถึง E+0.67) นั้น ทั้งก่อนและหลังการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบการทับถม โดยมีระยะการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +199.72ม. และ +578.53ม. ที่พ.ศ. 2538 และพ.ศ.2558 ตามลำดับ และชายฝั่งบ้านเขาเขียว (E+0.67 ถึง E+2.04) มีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบทับถมสลับการกัดเซาะ เล็กน้อยเพราะบริเวณนี้เป็นพื้นที่ติดภูเขา ทั้งก่อนและหลังก่อสร้าง โดยมีระยะการทับถมสูงสุด +119.09 ม. และ +327.89 ม. ในปีพ.ศ. 2538 และพ.ศ. 2558 ตามลำดับ(Figure 2)

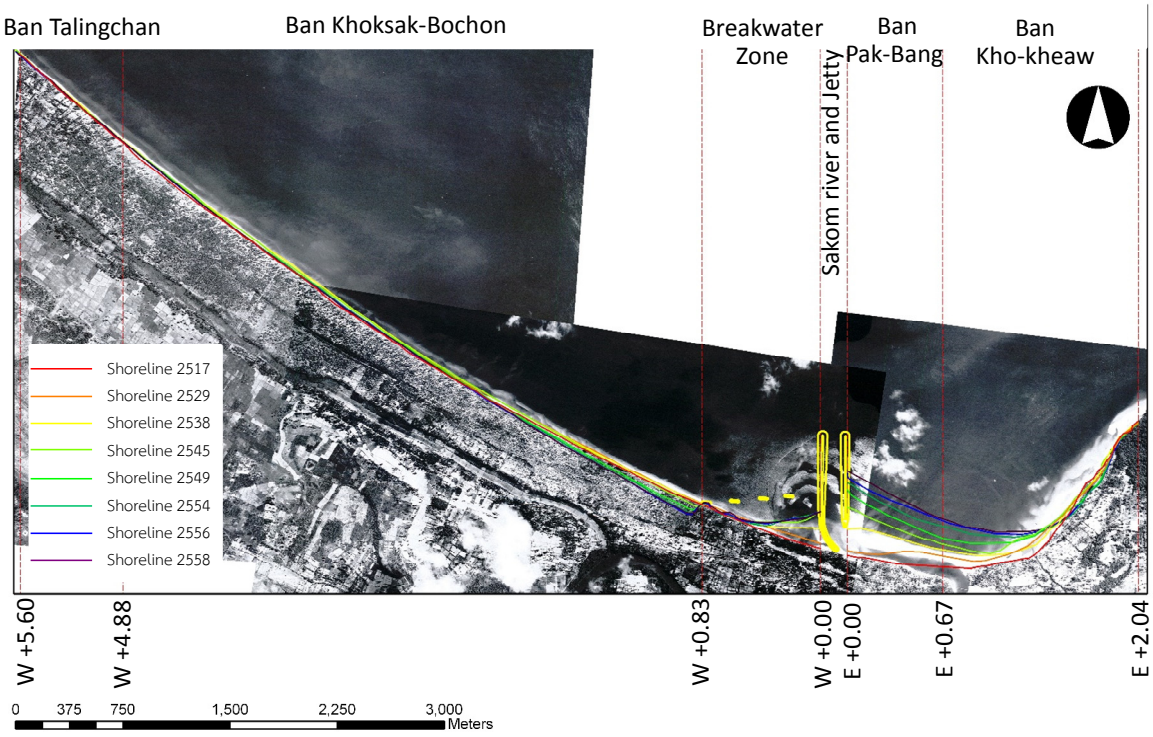


Figure 2 Shoreline Change at Sakom river mouth

การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่ง

จากการวิเคราะห์แนวชายฝั่งช่วงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517 ถึง พ.ศ. 2558 โดยพิจารณาจากแนวชายฝั่ง ณ ช่วงเวลาต่างๆ และหาพื้นที่การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสุทธิ พบว่า ช่วงก่อนการก่อสร้าง การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งของด้านตะวันตกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำนั้น มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสุทธิแบบทับถม อยู่ในช่วง +8,105.52 ตร.ม. ถึง +117,108.27 ตร.ม. หลังมีการก่อสร้าง พบว่า การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งนั้นมีการเปลี่ยนแปลงสุทธิจากการทับถม เป็นการกัดเซาะ อยู่ในช่วง -605.85 ตร.ม. ถึง -164,949.14 ตร.ม. โดยมีการกัดเซาะรุนแรงที่สุดช่วงบริเวณเขื่อนกันคลื่นตัวสุดท้ายถึงบ้านโคกสัก-บ่อโชน มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงสุทธิแบบกัดเซาะ เท่ากับ -164,949.14 ตร.ม. สำหรับด้านตะวันออกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำช่วงก่อนการก่อสร้างนั้น มีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสุทธิ แบบทับถม อยู่ในช่วง +62,281.21 ตร.ม. ถึง +115,336.19 ตร.ม. หลังมีการก่อสร้าง พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสุทธิแบบทับถมเพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง +51,560.30 ตร.ม. ถึง +142,559.13 ตร.ม. (Table1)

Table 1 Net of area change at Sakom river mouth

Area	Sta.	Net of Area Change, m^2	
		Before Constraction	After Constraction
		Year 2517 - 2538	Year 2545-2558
West of Sakom river mouth			(+) Deposition, (-) Erosion
West of Sakom river mouth To End of Breakwater	W + 0.00 To W + 0.83	+37,740.70	-605.85
End of Breakwater To Ban Khoksak-Bochon	W + 0.83 To W + 4.88	+117,108.27	-164,949.14
Ban Talingchan	W + 4.88 To W + 5.60	+8,105.52	-8,637.73
East of Sakom river mouth			(+) Deposition, (-) Erosion
East of Sakom river mouth To Ban Pak-Bang	E + 0.00 To E + 0.67	+115,336.19	+142,559.13
Ban Kho-kheaw	E + 0.67 To E + 2.04	+62,281.21	+51,560.30

เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งแบบสะสมใน 8 ช่วงเวลา ช่วงก่อนการก่อสร้าง ได้แก่ พ.ศ.2517, 2529 และ 2538 และ ช่วงหลังการก่อสร้าง ได้แก่ พ.ศ.2545, 2549, 2554, 2556 และ 2558 พบว่า การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสะสมด้านตะวันตกของปากร่องน้ำสะกอมซึ่งพิจารณา เป็น 2 รูปแบบ คือ จาก กม.W+0.00 ถึง W+5.60 (Net W) และ ไม่พิจารณาบริเวณ เขื่อนกันคลื่น (breakwater) จาก กม.W+0.83 ถึง W+5.60 (Net W+0.83 ถึง W+5.60) พบว่า ทั้งกรณีที่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสะสมบริเวณที่มีเขื่อนกันคลื่นและบริเวณที่ไม่มีเขื่อนกันคลื่นนั้น มีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเป็นไปในทางเดียวกัน คือ ช่วงก่อนการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบทับถม แต่เมื่อมีการก่อสร้างการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสะสมเปลี่ยนจากการทับถม เป็นการกัดเซาะ สำหรับการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสะสมด้านตะวันออกช่วง E+0.00 ถึง E+2.04 (Net E) ทั้งก่อนและหลังการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสะสมแบบทับถม (Figure 3)

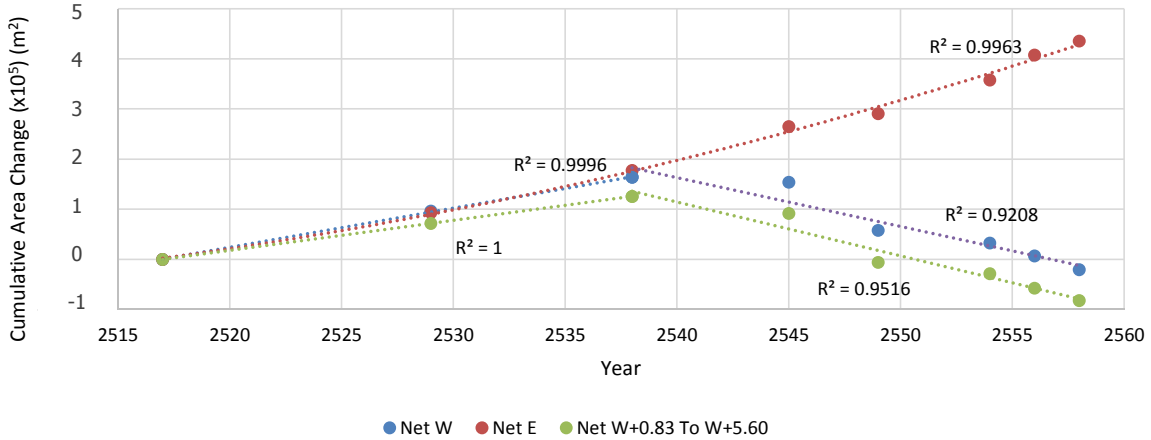


Figure 3 Cumulative of area change at Sakom river mouth

หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งแบบสะสม ดัง Figure 3 นั้นพบว่า ช่วงก่อนการก่อสร้าง บริเวณด้านตะวันออกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ มีแนวโน้มการทับถมในอัตรา +8,051.08.ม./ปี บริเวณด้านตะวันตกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ มีแนวโน้มการทับถมในอัตรา +7,449.18 ม./ปี ช่วงหลังการก่อสร้างบริเวณด้านตะวันออกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ มีแนวโน้มการทับถมในอัตรา +12,294.99 ม./ปี บริเวณด้านตะวันตกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสะสมบริเวณที่มีเขื่อนกันคลื่น มีแนวโน้มการทับถมในอัตรา -8,788.16 ม./ปี เมื่อไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงสะสมบริเวณที่มีเขื่อนกันคลื่น มีแนวโน้มการกัดเซาะในอัตรา -9,896.09.ม./ปี พื้นที่ชายฝั่งด้านตะวันตกของปากร่องน้ำมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งจากการทับถม เป็นการกัดเซาะเนื่องจากโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำวางตัวกีดขวางการเคลื่อนตัวของตะกอนเลียบชายฝั่ง ซึ่งพื้นที่ศึกษานี้มีทิศคลื่นหลักจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ

สรุป

ผลกระทบจากเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำสะกอมนั้น เมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่ง พบว่า ด้านตะวันตกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ ก่อนการก่อสร้างโดยภาพรวมของชายฝั่งด้านตะวันตกมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบทับถม โดยมีระยะการทับถมสูงสุดบริเวณเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำถึงเขื่อนกันคลื่น (W+0.00 ถึง W+0.83) เมื่อ พ.ศ.2538 เท่ากับ +132.32 ม. มีระยะการกัดเซาะสูงสุดบริเวณบ้านตลิ่งชัน (W+4.88 ถึง W+5.60) ระยะกัดเซาะสูงสุดเท่ากับ -4.48 ม. หลังการก่อสร้างพบว่าโดยภาพรวมมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งจากทับถมเป็นการกัดเซาะ โดยมีการกัดเซาะสูงสุดบริเวณ เขื่อนกันคลื่นตัวสุดท้ายถึงบ้านโคกสัก-บ่อโชน (W+0.83 ถึง W+4.88) มีระยะการกัดเซาะสูงสุดเท่ากับ -112.12 ม. ในปี พ.ศ. 2558 ด้านตะวันออกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ ก่อนและหลังการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบทับถม โดยมีระยะการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +199.72ม. และ +578.53ม. ที่พ.ศ. 2538 และพ.ศ.2558 ตามลำดับ

เมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่ง พบว่า ด้านตะวันตกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ ก่อนการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งโดยรวมแบบทับถม มีพื้นที่การทับถมสูงสุดบริเวณเขื่อนกันคลื่นตัวสุดท้ายถึงบ้านโคกสัก-บ่อโชน (W+0.83 ถึง W+4.88) มีพื้นที่เท่ากับ +117,108.27 ตร.ม. หลังการก่อสร้าง พื้นที่โดยรวมมีการเปลี่ยนแปลงจากทับถม เป็นการกัดเซาะ มีพื้นที่การกัดเซาะสูงสุดบริเวณเขื่อนกันคลื่นตัวสุดท้ายถึงบ้านโคกสัก-บ่อโชน (W+0.83 ถึง W+4.88) มีพื้นที่เท่ากับ -164,949.14 ตร.ม.สำหรับด้านตะวันออกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบทับถมเช่นเดิม

เมื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งจากพื้นที่ชายฝั่งสะสมใน 8 ช่วงเวลา พบว่า ก่อนมีโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ ทั้งด้านตะวันตกและตะวันออก มีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสะสมเป็นแบบทับถม หลังมีโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ ด้านตะวันตกมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสะสมจากทับถม เป็นการกัดเซาะ ด้านตะวันออก ยังมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสะสมแบบทับถมเช่นเดิม ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณนี้มีการเคลื่อนตัวของตะกอนเลียบชายฝั่งจะมีทิศทางการเคลื่อนตัวสุทธิจากทิศตะวันออก ไปทางทิศตะวันตก ดังนั้น เมื่อมีโครงสร้างป้องกันชายฝั่งขวางการเคลื่อนตัวของตะกอนชายฝั่งจึงส่งผลกระทบทำให้เกิดการกัดเซาะทางด้านทิศตะวันตกของเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ

เมื่อคาดการณ์แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง หากไม่มีโครงสร้างทางวิศวกรรมชายฝั่งใดๆ เพิ่มเติมจากปัจจุบัน สำหรับด้านตะวันตกของปากร่องน้ำสะกอม ชายฝั่งจะยังมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบกัดเซาะ ส่วนด้านตะวันออกของปากร่องน้ำสะกอม ชายฝั่งก็ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งแบบทับถม

เอกสารอ้างอิง

ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, กรม , 2557. **คู่มือการจัดตั้งเครือข่ายประชาชนในการป้องกันและแก้ไขปัญหาการกัดเซาะชายฝั่ง**. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, กรุงเทพฯ

สิน สินสกุล และคณะ, 2545. **การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเลด้านอ่าวไทย**. กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี

สุรเชษฐ์ รวมธรรม และคณะ, 2555. **การศึกษาการเปลี่ยนแปลงธรณีสัณฐานชายฝั่งทะเล จังหวัดระนอง**. สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพฯ

Elizabeth H. Boak and Ian L. Turner, 2005. Shoreline Definition and Detection : A Review, **Journal of Coastal Research** Number 214: 688-703.

Anoxic Process for Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Contaminated Kaohsiung Harbor Sediment

Peerada Subannarat[1*], Chia-Yuan Chang[2], Cheng-Di Dong[3], Dome Adoonsook[4] and Chart Chiemchaisri[1]

ABSTRACT

Kaohsiung harbor sediment was significantly contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), which affecting the aquatic environment. The aim of this study was to investigate the performance of indigenous bacteria and exogenous bacteria isolated from diesel storage tank for remediation of contaminated sediment from Kaohsiung Harbor. In addition, PAHs removal from Kaohsiung harbor sediment under anoxic condition and the cell viability of treated harbor sediment were also investigated. The batch experiment was set up with 3 experiments. The results showed that the indigenous bacteria could biodegrade both LMW and HMW PAHs, 57% of Fluoranthene, 73% of pyrene and 100% of Benzo[b]fluoranthene, Benzo[k]fluoranthene and Benzo[a]pyrene. The exogenous bacteria without nutrient solution could transform HMW PAHs, 53% of chrysene and 69% of Benzo[a]pyrene. The exogenous bacteria with nutrient solution could degrade both LMW and HMW PAHs, especially HMW up to 50-100%. The highest viability of normal cell (clone9) was observed at the condition of exogenous bacteria without nutrient solution feeding. The results revealed that the indigenous bacteria was efficient in biodegrade both LMW and HMW PAHs with 62% total removal efficiency, the exogenous bacteria could biodegrade HMW PAHs, however it was not the most effective in biodegradation of PAHs in harbor sediment.

Key words: Anoxic process; Harbor sediment; PAHs; Bacteria mixture: Indigenous bacteria; exogenous bacteria.

*Corresponding author; e-mail address: g5714552377@ku.ac.th

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

[2]Department of Environmental Engineering and Science, Chia Nan Univeristy of Pharmacy and Science, Tainan, 71710

[3]Department of Marine Environment Engineering, National Kaohsiung Marine University,Kaohsiung,81157

[4]Department of Environment Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200

INTRODUCTION

Kaohsiung Harbor is the estuary with 4 major rivers. In this area have several industrial plants that discharge inadequately treated wastewater into Kaohsiung tributaries that bring the suspended solid and pollutants accumulated in Kaohsiung harbor sediment. The characteristic of PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) toxicity of dredged Kaohsiung harbor sediment is at 'moderate contamination level' and medium-low probability of toxicity pollution level (Chen et al., 2013), the accumulation of PAHs in Kaohsiung harbor sediment occurred by the river and municipal runoff. Due to their persistence and extensive distribution in the environment (Li et al., 2011), they are often bounded to particulate organic matter and accumulated in marine sediment.

Biological process for the treatment of PAHs has received significant attention (Haritash and Kaushik, 2009), that attenuation or transformation of pollutant compounds by seeking the potential of microorganisms utilized hydrocarbons as carbon sources to PAHs degradation via metabolism and cometabolism (Chauhan et al., 2008). Most of PAHs at contaminated sites would accumulate under anaerobic and anoxic zones (Lu et al., 2011a), PAHs degradation was due to the increasing of microbial biomass in sediment and boost PAH biodegradation. PAHs are often accumulated in marine sediment causing high toxicity lead to disturb reproductive of marine organism. The cytotoxicity has been analyzed for identification of the potential toxicity in sediment, which effect on bacteria viability (Yang, 2010).

In this study, indigenous bacteria from Kaohsiung harbor sediment and exogenous bacteria consisting three bacteria strains, i.e. *Achromobacter insolitus, Candida spp. and Xanthobacter polyaromaticivorans* were applied to degrade 2 and 3 ring PAHs and hydrocarbons. The aims of this study were to investigate the performance of indigenous bacteria from harbor sediment and the exogenous bacteria under anoxic condition in organic and PAHs biodegradation from contaminated harbor sediment, and the cell viability on treated harbor sediment.

MATERIALS AND METHODS

1. Sediment samples

The sediment used for this experimental study was collected from Kaohsiung port using the 6 in. × 6 in. × 6 in. Ekman Dredge grab sampler and stored in polyethylene bottles then transported back to the laboratory. The sediment was preserved in air dry before analysis. The sediment sample was lightly crushed with a wooden board and then screened through 1 mm nylon net to remove particles with diameters larger than 1 mm.

2. Enrichment of bacteria mixture

Bacteria mixture, obtained from Chia Nan University of Pharmacy and Science laboratory which was isolated from diesel storage tank, was used for the treatment of diesel contaminated soil

washed by surfactant. The components of nutrient solution were glucose, NH_4Cl, $NaHCO_3$, KH_2PO_4, $MnCl_2{\cdot}4H_2O$, $ZnCl_2{\cdot}2H_2O$, $CuCl_2{\cdot}2H_2O$, $MgSO_4{\cdot}7H_2O$, $FeCl_3{\cdot}6H_2O$ and $CaCl_2{\cdot}2H_2O$ (210, 200, 220, 22-34, 0.19, 0.0018, 0.022, 5.6, 0.88 and 1.3 mg/l respectively). In additional *Achromobacter insolitus*, *Candida spp*, and *Xanthobactor polyaromaticivorans* are the three strains of diesel-degrading bacteria, which *Achromobacter insolitus* were identified as capable of degrading phenanthrene (Janbandhu and Fulekar, 2011), *Candida spp.* these yeast strains use for bioremediation process of hydrocarbon contaminated (Boutheina ,et al.,2015), *Xanthobactor polyaromaticivorans* was capable of degrading 2 and 3 ring polycyclic and heterocyclic aromatic compound under both aerobic and low oxygen condition (Hirono et al., 2003). The bacteria mixture was acclimated with nutrient solution.

3. Batch experiment setup

The batch experiments were setup in 3 condition; Experiment 1: indigenous bacteria from harbor sediment, Experiment 2: Inoculant exogenous bacteria and Experiment 3: Inoculant exogenous bacteria with nutrient solution feeding. The batch experiment reactor was conducted by using 1L of closed laboratory bottle covered with aluminum paper to prevent light and purged with N_2. The harbor sediment and solution were mixed together on 1:100 by weight/volume. The bacteria from laboratory were centrifuged at 5000 rpm for 5 min by Versatile Compact centrifugator (Model CF16RX). The bottles were sealed and placed on the stirrer for mixing sediment and solution. The experiment was carried out using side-stream microfiltration (MF) hollow fiber membrane with 0.1-micrometer pore size to permeate the solution. The batch experiment duration time was 10 days for each run.

4. Analytical methods

PAHs samples were collected from the reactor at the beginning and the end of each run (10 days periods). The PAHs mixture samples were extracted by adding 1:1 (v/v) acetone/n-hexane and surrogate standard mixture (2-fluorobiphenyl and 4-terphenyl-d14) solution. For extraction, the samples were mixed by Vertex mixer for 5-10 seconds and precipitated by ultrasonic cleaner for 10 min, triplicated the extraction step. Then the samples were centrifuged at 3000 rpm for 5 min. Samples from supernatant were analyzed by gas chromatography with mass selective detection (GC-MS) using Agilent 6890N GC (Agilent technologies, Santa Clara, CA, USA) equipped with an Agilent 7683B Injector (Agilent Technologies, Santa Clara, USA) and Agilent 5975 mass selective detector (MSD) (Dong et al., 2012).

The cytotoxicity of Kaohsiung harbor sediment was examined by MTT assay. The yellow MTT (3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyl tetrazolium bromide) was reduced and converted to blue formazan product by mitochondrial succinic dehydrogenase in viable cell. Briefly, Clone9 and HepG2

cell were plated at density of 2×105 cells/ml into 96-well plates and overnight growth. After that the cells were treated with various concentrations of Kaohsiung marine sediments extracts and incubated for 24 h. After 24 h exposure period, MTT was added to cell and incubated for 3 h. Cell viability was determined by scanning with an ELISA reader at 570 nm.

RESULTS AND DISCUSSION

1. PAH degradation by indigenous bacteria

The results of PAH degradation (Table 1) by indigenous bacteria from Kaohsiung Harbor sediment under anoxic condition revealed the degradation of 2-,3-,4- and 5- ring PAHs. The removal efficiency of naphthalene (NA), acenaphthylene (ACY), acenapthene (ACE), phenanthrene (PH), fluoranthene (FLU) and pyrene (PY) were 13.29, 31.52, 33.44, 19.69, 57.67 and 73.77 % respectively and the indigenous bacteria could also degrade trace amount of chrysene (CH), benzo[b]flioranthen (BbF), benzo[k]fluoranthen (BkF) and benzo[a]pyrene (BaP) up to 100% removal efficiency. The degradation of high meolecular weight (HMW) PAHs as CH, BbF, BkF and BaP was possibly through the biotransformation by indigenous bacteria to less aromatic. The result also showed high degradation of PY at initial level of 17.03 to 4.47 ug/kg. It is known that PY had low water solubility, high adsorption on sediment particles and they were recalcitrant in contaminated sediment (Tam and Wong, 2008). However, the indigenous bacteria in harbor sediment could enhance bioavailability in PAHs degradation especially the high degradation of pyrene. Many studies revealed that the indigenous bacteria in sediment were efficient in PAHs degradation. Tam and Wong, 2008 reported that the PAHs contaminated in sediment could be degraded by natural attenuation. The sediment may contain sufficient indigenous bacterium capable of degrading both low molecular weight (LMW) PAHs and HMW PAHs from contaminated sediment, as seen in total PAHs removal efficeincy of 62 %. Muangchinda et al. (2016) reported that indigenous bacteria in river sediment could degrade high concentration of mixed PAHs. The efficient of PAHs biodegradation in contaminated harbor sediment by natural attenuation might due to the capable of acclimation and adaptation of microorganism in sediment.

2. Effect of inoculant on PAHs degradation

Kaohsiung Harbor sediment was inoculated with 3 strains of bacteria mixture, i.e. *Achromobacter insolitus*, *Candida spp*. and *Xanthobacter polyaromaticivorans*. As showed in Table 1, the results reveal the degradation of HMW of PAHs (CH, BbF, BkF and BaP). The PAHs removal efficiencies of CH, BbF, BkF and BaP were 53.65, 29.20, 69.55 and 27.83% respectively. Due to its HMW, they are more recalcitrant in availability for degradation because they consisting of 4 or more fused benzene rings, molecular stability and their low water solubility. The degradation of high

aromatic ring PAHs might have been from the biotransformation by bacteria mixture that transformed high aromatic rings to less aromatic ring PAHs. Breakdown of high aromatic ring PAHs can generate metabolites that may have inhibitory effect to bacterial populations which are capable of breaking down the LMW PAHs (Maillacheruvu and Pathan, 2009).

3. Effect of nutrient solution on PAHs degradation

Feeding nutrient solution for inoculated bacteria mixture of 3 strains in Kaohsiung Harbor sediment. The results of PAH degradation (Table 1) implies that they could biodegrade both LMW and HMW up to 50-100% with total PAHs removal efficiency of 14.75%. Hirano et al. (2007) reported that *Xanthobacter polyaromaticivorans* is capable of degrading 2 and 3 ring PAHs and heterocyclic aromatic compounds. It has been found that this strain could degrade even under low oxygen condition. Gargouri et al. (2015) reported that the yeast strain *Candida spp* have shown their ability to degrade wide range hydrocarbon. These 3 strains mixture were applied for biodegradation of harbor sediment. The results show that the bacteria mixture with sufficient nutrient solution could degrade both LMW PAHs and HMW PAHs. Several studies have investigated the effectiveness of mixed culture bacteria in PAHs biodegradation (Dou et al., 2009; Janbandhu and Fulekar, 2011). The result revealed that the synergism of inoculated bacteria and indigenous bacteria with nutrient solution feeding could biodegrade both LMW and HMW PAHs. However, natural attenuation by indigenous bacteria appeared to be the most efficient in biodegradation of PAHs contaminated in harbor sediment, while bioaugmentation by inoculated bacteria mixture could biotransform HMW PAHs into less aromatic ring PAHs which increasing LMW PAHs concentration, and biostimulation by inoculated bacteria mixture and nutrient feeding. The nutrient solution enhanced both LMW and HMW PAHs biodegradation, however the total PAH removal was lower than natural attenuation. Bento et al. (2005) reported that the indigenous bacteria are well adjusted to their own environment. The natural attenuation was the most appropriate way to remedy PAHs contaminated mangrove sediment.

Table 1 The removal efficiency of 16 PAHs in treated harbor sediment under anoxic condition.

Compounds	Experiment 1			Experiment 2			Experiment 3		
	In (μg/kg)	Out (μg/kg)	Removal efficiency (%)	In (μg/kg)	Out (μg/kg)	Removal efficiency (%)	In (μg/kg)	Out (μg/kg)	Removal efficiency (%)
NA	2.24	1.95	13.29	0.97	1.01	-	1.56	1.67	-
ACY	0.21	0.15	31.52	0.10	0.12	-	0.18	0.16	12.32
ACE	1.13	0.75	33.44	0.61	0.79	-	0.96	0.97	-
FL	0.84	0.93	-	0.42	0.48	-	0.89	0.83	6.97
PH	3.52	2.82	19.69	1.63	2.08	-	3.07	2.84	7.77

AN	-	0.06	-	-	-	-	0.25	-	100
FLU	3.01	1.27	57.67	1.40	1.73	-	2.53	2.02	20.26
PY	17.03	4.47	73.77	2.46	3.30	-	4.59	3.32	27.74
BaA	-	-	-	-	-	-	0.07	-	100
CH	0.15	0.21	-	0.25	0.12	53.65	0.73	0.35	52.02
BbF	0.66	-	100	0.48	0.34	29.20	0.67	0.13	80.83
BkF	1.12	-	100	0.76	0.23	69.55	0.06	-	100
BaP	3.84	-	100	1.03	0.74	27.83	0.08	1.04	-

4. Cytotoxicity of treated habor sediment

Figure 1 shows the MTT cytotoxicity of harbor sediment on liver normal cell (Clone9) and human cancer cell (HepG2) of treated and untreated harbor sediment. The results revealed that the cell viability of Clone9 cell was lower than the cell viability of HepG2 for all of 3 treated sediment, indicated that the cytotoxicity of harbor sediment on Clone9 cell was higher than HepG2. These might due to the fact that that HepG2 had higher detoxification enzyme for metabolize other foreign compounds than normal cells (Kang et al., 2010). Yang et al. (2010) found that PAH correlated with toxicity. However, the cell viability of Clone9 cell in inoculated bacteria mixture with and without nutrient solution feeding were higher than the original harbor sediment, due to the inoculated bacteria mixture and the cell might be viable in the harbor sediment. The cell viability of indiginous bacteria was 62%, lower than the original harbor sediment. While in case of inoculated bacteria mixture, the cell viability of Clone9 cell was highest (77%) and they could degrade HMW PAHs up to 69% due to the synergistic of indigenous bacteria and inoculated bacteria. For inoculated bacteria mixture with nutrient solution feeding, the cell viability of Clone9 cell was 69% and they could degrade both LMW and HMW PAH up to 50-100%. However the cytotoxicity could imply the cell viability in treated harbor sediment but bacteria strains were not identified in this study.

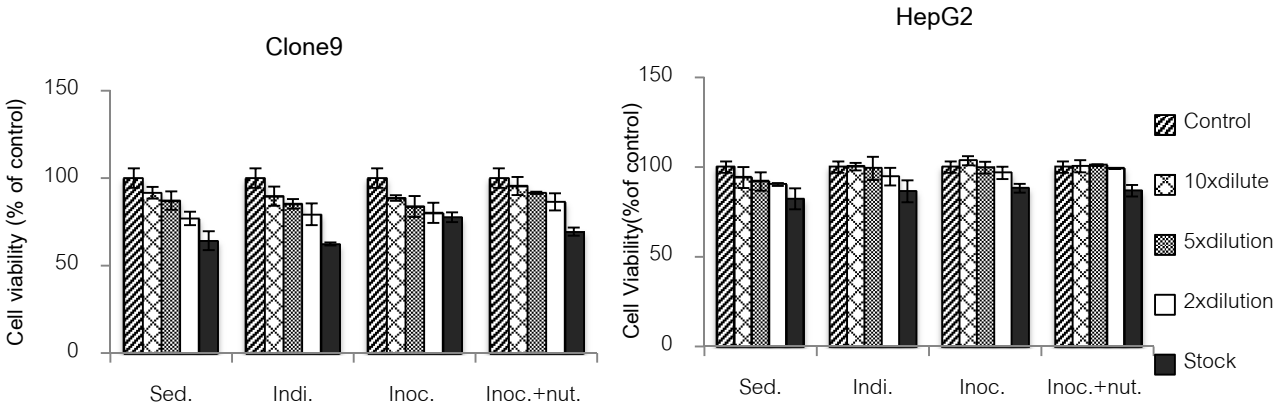


Figure 1 Viability of liver normal cell (Clone9) and human cancer cell (HepG2) in treated harbor sediment

Note: Sed.=Sediment; Indi.=Indigenous; Inoc.=Inoculant; nut.= nutrient solution; Control=100% of Clone9 or HepG2 cell; 10xdiution=10%dilution, 5xdilute=5%dilution, 2xdilute=2%dilution of sample; Stock=Untreated Sediment.

CONCLUSION

The indigenous bacteria from harbor sediment could degrade 2 and 3 rings PAHs at 13-33% removal efficiencies, and also HMW PAHs, i.e. 57% of Fluoranthene, 73% of pyrene and 100% of BaF, BkF and BaP. The total PAHs removal was up to 62%. The exodogenous bacteria could biotransform HMW-PAHs to less aromatic ring by 50-69%. When feeding with nutrient solution, exogenous bacteria could degrade both LMW and HMW PAHs, 50-100% of HMW PAHs degradation, however it inhibited the degradation of NaP and BaP. The total PAHs removal was 14.75%. The cell viability revealed that cell was viable in harbor sediment and was highest viable in the mixed culture of indigenous and inoculated bacteria without nutrient solution feeding. However highest PAH degradation was found using indigenous bacteria due to the natural attenuation.

REFERENCES

Chauhan, A., Fazlurrahman, Oakeshott, J.G., Jain, R.K. 2008. Bacterial metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons: strategies for bioremediation. **Institute of Microbial Technology** 48: 95-113.

Chen, C.F., Dong, C.D.,Chen, C.W. 2013. Evaluation of Sediment Toxicity in Kaohsiung Harbor, Taiwan. **Soil and Sediment Contamination** 22: 301-314.

Dong, C.D., Chen, C.F., Chen, C.W. 2012. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Industrial Harbor Sediments by GC-MS. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 9: 2175-218.

Dou, J., Liu, X., Ding, A. 2009. Anaerobic degradation of naphthalene by the mixed bacteria under nitrate reducing conditions. **Journal of Hazardous materials** 165: 325-331.

Gargouri, B., Mhiri, N., Karray, F., Aloui, F., Sayadi, S. 2015. Isolation and Characterization of Hydrocarbon-Degrading Yeast Strains from Petroleum Contaminated Industrial Wastewater. **BioMed Research International** 2015: 11.

Haritash, A.K., Kaushik, C.P., 2009. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review. **Journal of Hazardous Materials** 169, 1-15.

Hirano, S.I., Morikawa, M., Takano, K., Imanaka, T., Kanaya, S. 2007. Gentisate 1,2 Dioxygenase from Xanthobacter polyaromaticivorans 127W. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry** 71: 192-199.

Janbandhu, A., Fulekar, M.H. 2011. Biodegradation of phenanthrene using adapted microbial consortium isolated from petrochemical contaminated environment. **Journal of Hazardous Materials** 187: 333-340

Kang, Y., Cheng, K.C., Wong, M.H. 2010. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different indoor dusts and their potential cytotoxicity based on two human cell lines. **Environment International** 36: 542-547.

Li, C.H., Ye, C., Wong, Y.S., Tam, N.F.Y. 2011. Effect of Mn(IV) on the biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons under low oxygen condition in mangrove sediment slurry. **Journal of Hazardous Materials 190**: 786-793.

Lu, X.Y., Zhang, T., Fang H.H., Leung K.M.Y., Zhang G. 2011. Biodegradation of naphthalene by enriched marine denitrifying bacteria. **International Biodeterioration & Biodegradation** 65: 204-211.

Maillacheruvu K.Y., Pathan I.A. 2009. Biodegradation of naphthalene, phenanthrene, and pyrene under anaerobic conditions. **Journal of Environmental Science and Health**, Part A 44: 1315-1326.

Muangchinda, C., Yamazoe, A., Polrit, D., Thoetkiattikul, H., Mhuantong, W., Champreda, V., Pinyakong, O. 2016. Biodegradation of high concentrations of mixed polycyclic aromatic hydrocarbons by indigenous bacteria from a river sediment: a microcosm study and bacterial community analysis. **Environmental Science and Pollution Research** 24: 4591-4602.

Tam, N.F.Y., Wong, Y.S. 2008. Effectiveness of bacterial inoculum and mangrove plants on remediation of sediment contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons. **Marine Pollution Bulletin** 57: 716-726.

Yang, F., Zhang, Q., Guo, H., Zhang, S. 2010. Evaluation of cytotoxicity, genotoxicity and teratogenicity of marine sediments from Qingdao coastal areas using in vitro fish cell assay, comet assay and zebrafish embryo test. **Toxicology in Vitro** 24: 2003-2011.

Aerobic Process for Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Contaminated Harbor Sediment

Sudarat Jaisaard[1*], Cheng-Di Dong[2], Chia-Yuan Chang[3], Chart Chiemchaisri[1] and Dome Adoonsook[4]

ABSTRACT

The aim of the study was to investigate the possibility of applying mixed culture bacteria prepared from contaminated soil to remove polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the sediment. The bacteria mixture consists of three specific diesel degrading bacteria including *Achromobacter insolitus*, *Candida spp.* and *Xanthobactor polyaromatici yorans* isolated from a diesel storage tank. The experiments were carried out under 3 different conditions, i.e. with presence of 1) harbor sediment, 2) harbor sediment with mixed culture bacteria and 3) harbor sediment with mixed culture bacteria and synthetic nutrient solution. At the end of experiment, treated solution was obtained from filtration using microfiltration (MF) membrane to retain the microorganisms inside the reactor. The results show that indigenous microorganisms in harbor sediment could remove almost all PAHs with highest removal of anthracene (An) at 92.05%. The mixed culture bacteria could remove 86.19% of benzo[b] fluoranthene (BbF) from contaminated sediment. The experiment with nutrient solution addition removed high molecular PAHs, i.e. chrysene (Chr), benzo[b]fluoranthene (BbF), benzo[k]fluoranthene (BkF) at 21.29, 42.21, and 61.38%, respectively. The cytotoxic effect of treated sediment was evaluated using cell viability of normal cells (Clone 9) and cancer cells (HepG2). Highest normal cells viability of 71.73% was observed for sediment treated by indigenous microorganisms in harbor sediment and highest cancer cells viability of 93.16% was observed for treated sediment with mixed culture bacteria and nutrient solution.

Key words: aerobic, PAHs, harbor sediment, cytotoxicity, diesel degrading bacteria

*Corresponding author; e-mail address: jaisaard29@gmail.com

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Department of Marine Environmental Engineering, National Kaohsiung Marine University, Kaohsiung City 81157, Taiwan

[3]Department of Environmental Engineering and Science, Chia Nan University of Pharmacy and Science, Tainan 71710, Taiwan

[4]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

INTRODUCTION

The largest international port in Taiwan is Kaohsiung harbor, which is located in the south of Taiwan. The activities around the port are potential sources of organic and inorganic pollutant contamination in sediment (e.g. heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), dioxins, nutrients, organic carbons, PCB and organochloride pesticides) which came from river flows, atmospheric precipitation, accidental discharges and municipal runoff into river, port, and aquatic environment (Dong et al., 2014). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are hydrophobic organic compounds (HOCs), composed of two or more fused benzene rings which exists naturally or come from anthropogenic source. United State Environmental Protection Agency (US EPA) has identified 16 PAHs as the priority pollutants (Kanaly and Harayama, 2000). PAHs are persistent in the environment and has the ability to accumulate in food chains, leading to ecological and human health risks (Bacosa and Inoue, 2015). PAH compounds are potentially genotoxic, implying that they can damage DNA directly and/or generate reactive species (such as free radicals or electrophilic metabolites) which can, in turn, damage DNA (Cachot et al. 2006). Aerobic biodegradation can degrade both inorganic and organic pollutants in the presence of oxygen into smaller compounds, and converted them into final products which could be carbon dioxide and water (Gan et al., 2009). The biological degradation of petroleum compounds typically occurs under aerobic (high oxygen) involving oxygenase-mediated ring oxidation and ring fission, metabolism, subsequent catabolite, and formation (Yuan et al., 2000). The bacteria capable of degrading PAHs found in the marine environment are *Pseudomonas, Vibrio, Achromobacter, Corynebacter, Arthrobacter, Acinetobacter, Micrococcus Nocardia*. Moreover, fungi found growing in the same environment are *Aureobasidium, Candida, Rhodotorula*, and *Sporobolomyces* (Desai and Vyas, 2006). In recent studies, bacteria and fungi mixture were utilized to enhance PAHs biodegradation. To evaluate cytotoxicity effect of PAHs, there are many established end point assays including neutral red assay, LDH assay, MTT assay, and crystal violet assay.

The aim of this work is to investigate the removal of PAHs and SCOD contaminated in harbor sediment. The using bacteria mixtures, of *Achromobacter insolitus*, *Candida spp*., and *Xanthobactor polyaromatici* under aerobic treatment of harbor sediment and to evaluate the cytotoxicity of treated sediment.

MATERIALS AND METHODS

1. Harbor sediment

The sediment used in this study was collected from Salt River Mount located at Kaohsiung Harbor, Kaohsiung City, in Taiwan. The samples are collected as described by Chen (2011). Briefly, the surface sediment samples (0 - 15 cm) were collected using an Ekman Dredge grab sampler (6 in.

× 6 in. × 6 in.). The samples were preserved by air drying and crushed by the wooden board then screened through 1 mm nylon net. The total concentration of PAHs in harbor sediment is 8.1830 mg/kg.

2. Mixed culture bacteria

The mixed culture bacteria contain three strains of diesel degrading bacteria; *Achromobacter insolitus, Candida spp.,* and *Xanthobactor polyaromatici*. The mixed culture bacteria were grown up with synthetic wastewater by increasing their mass concentration as expressed in term of MLVSS from substrate (COD) utilization. The cultured bacteria was then concentrated by centrifugation at 8000 rpm for 5 min.

3. Aerobic batch experiments

The experiments were carried out under 3 different conditions. In experiment 1, 8 g of sediment and 800 mL reverse osmosis (RO) water was added to glass container and mixed by magnetic stirrer at room temperature for 7 days. At the end of each run, the solution was sucked off 60% using submerged microfiltration (MF) hollow fiber membrane and then replaced with a new solution and harbor sediment in the reactor. In other experiments, mixed culture bacteria (2.6 g) were added to the container in experiment 2 and 3 whereas 800 mL of nutrient solution (glucose) was added in experiment 3 only. Before starting new experiment, residual solution and treated sediment were sampled for soluble and total chemical oxygen demand (SCOD, TCOD), total and volatile mixed liquor suspended solid concentrations (MLSS, MLVSS), PAHs, and cytotoxicity analyses.

4. PAHs analysis

PAHs extraction and analysis were performed following procedures described in Dong (2012). Briefly, 10 ml of sample was extracted by adding n-hexane and the surrogate standard mixture was mixed for 1 min and extract using ultrasonic bath for 10 min. The same extraction procedure was repeated 3 times. The prepared mixture was then centrifuged for 5 min at 3000 rpm after which the sediment was separated from the supernatant and transferred into 1 ml of the supernatant for gas chromatography with mass selective detection (GC-MSD) analysis for determining PAH components and their concentrations.

5. Cytotoxicity assay

Cell ability was determined using standard MTT [3-(4,5-dimethylthiazol-2,5-diphenyl tetrazolium bromide) assay. Clone9 and HepG2 cells were cultured in 96-well plates at an initial concentration of 2×10^5 cells ml^{-1} for 24 hrs. After overnight growth, sediment sample was added to the

wells at various concentrations (2x, 5x and 10x of dilution) and incubated for 24 hrs. At the end of treatment, MTT solution was added to the wells then the cells were incubated for 3 h. MTT was reduced to a purple formazan product by mitochondrial dehydrogenases in viable cells. The MTT-formazan product was dissolved in MTT lysis buffer then using an ELISA plate reader and measurement of absorbance at 570 nm (Lin et al. 2008).

RESULTS AND DISCUSSION

1. PAHs degradation under different conditions

PAHs degradation under three experimental conditions are shown in Table 1. The results show that PAHs degradation in experiment 1 under the presence of RO water with harbor sediment was generally higher among all experiments. Among them, anthracene (An) was highest removed at 92.05%. These results suggest that indigenous bacteria presented in harbor sediment were capable to degrade PAHs. For some compound e.g. benzo [k] fluoranthene, the addition of mixed culture bacteria and nutrient solution gave positive effect on PAHs degradation. When mixed culture bacteria and nutrient solution were added, the low ring PAHs cannot degrade due to the selective nutrient supply of microorganisms for growth and transformation of high ring PAHs to low ring PAHs. Seo at al. (2009) reported the catabolic metabolism of fluoranthene to fluorine pathway, pyrene to phenanthrene pathway, fluorine to naphthalene pathway.

PAHs with 2-4 rings are less toxic and biodegradable depending on the level of complexity. In this study, all low-molecular-weight aromatics can be degraded by indigenous bacteria. PAHs degradation of low molecular weight which is 2 and 3-ring PAHs cannot be degraded under the combination of indigenous and mixed culture bacteria. This is contrast to the results reported in Janbandhu and Fulekar (2011) which showed that phenanthrene in contaminated soil was removed by Sphingobacterium sp., Bacillus cereus and *Achromobacter insolitus* MHF ENV IV within 14 days with decreasing of pH from 7 to acidic range (5.6-5.2) during bioremediation process. Meanwhile, the removal efficiency of anthracene (An) by indigenous and mixed culture bacteria was only 48.10% in this study. In contrast, Anthracene, phenanthrene, and pyrene contaminated in seawater were found highly removed by *Achromobacter sp*. HZ01 within 30 days (Deng et al., 2014). One of the reason for this difference would be the biodegradation period used in this study was too short for PAHs degradation when compared to that reported in other study.

Table 1 The PAHs degradation under aerobic condition.

Rings	PAHs	Experiment 1			Experiment 2			Experiment 3		
		Initial (mg/kg)	Final (mg/kg)	Efficiency (%)	Initial (mg/kg)	Final (mg/kg)	Efficiency (%)	Initial (mg/kg)	Final (mg/kg)	Efficiency (%)
2	NA	0.0011	0.0008	24.8180	0.0011	0.0011	0.0000	0.0008	0.0011	0.0000
3	ACY	0.0001	0.0001	32.1742	0.0001	0.0001	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000
3	ACE	0.0005	0.0004	26.8263	0.0004	0.0005	0.0000	0.0004	0.0005	0.0000
3	FL	0.0005	0.0003	29.2482	0.0003	0.0004	0.0000	0.0003	0.0004	0.0000
3	PH	0.0016	0.0013	21.4858	0.0015	0.0016	0.0000	0.0009	0.0011	0.0000
3	AN	0.0002	0.0000	92.0506	0.0001	0.0000	48.1028	N.D.	N.D.	0.0000
4	FLU	0.0019	0.0018	8.8141	0.0013	0.0010	18.0493	0.0007	0.0008	0.0000
4	PY	0.0028	0.0027	3.3766	0.0023	0.0020	10.4539	0.0012	0.0015	0.0000
4	BaA	0.0002	0.0001	33.0182	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
4	CH	0.0005	0.0005	6.5023	0.0003	0.0003	17.1404	0.0001	0.0001	21.2926
5	BbF	0.0007	0.0013	0.0000	0.0008	0.0001	86.1853	0.0002	0.0001	42.2084
5	BkF	0.0014	0.0013	6.8046	0.0000	0.0000	27.8901	0.0002	0.0001	61.3820
5	BaP	0.0010	0.0006	43.3538	0.0000	0.0006	0.0000	0.0003	0.0004	0.0000
6	IP	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
6	DA	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
6	BP	0.0003	0.0001	54.8377	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	ΣPAHs	0.0127	0.0112	11.8998	0.0082	0.0078	4.8374	0.0052	0.0062	0.0000

The degradation of 6-ring PAHs was not detected because of the physical-chemical properties of compounds which are high molecular weight. Low water solubility also leads to a difficult condition for its degradation. Chaîneau et al (2005) reported the addition nutrient did not inhibit microbial growth and provide no toxic condition to the microbial population but the HC biodegradation was selective depending on the nutrient supply. On the other hand, high level of nutrient inhibited temporally the assimilation of aromatics due to the decrease in nutrient concentration in the assimilation of other carbon sources in the soil. Under the presence of glucose as carbon source, there was a decrease and an increase in 6.79-fold and 1.24-fold of low molecular weight PAHs and high molecular weight PAHs degradation respectively (Dave et al. 2014). The addition of organic supplements increased the rate of contaminant degradation whereas excessive supplementation inhibited degradation. When the added carbon source is preferentially degraded over the target compounds, microbial activity for degrading the target contaminants may be inhibited (Yuan et al. 2009).

In contrast, when compare the results in mass removal found that the experiment 3 was lowest initial of total PAHs concentration of 0.0052 mg/kg. For the experiment 2 and 1 were 0.0082 and 0.0127 mg/kg, respectively. That mean the experiment with nutrient solution has been degraded PAHs all the

time may due to the activity or other mechanisms of bacteria high active than experiment without nutrient solution and mixed culture bacteria.

However, the concentrations of total PAHs for each experiment are less than the PAHs concentration in harbor sediment that mean all of experiments was achieved for PAHs degradation from harbor sediment by aerobic condition.

2. Comparison of cytotoxicity

The growth of normal and cancer cells from the toxicity of three experiments are presented in Figure 2. The results showed that cancer cells have high cell viability than normal cells due to cancer cells contain higher activity of detoxification enzymes for the metabolism of many foreign compounds. The highest cell viability of normal cells was 71.56% of treated sediment by indigenous bacteria (experiment 1) due to the reducing of toxicity from harbor sediment by degradation of BaP, a representative carcinogenic compound which found in the environment and can be induced genotoxic effect (Wei et al. 2009; Park et al. 2006). For cancer cells, 93.16% was the highest cell viability of treated sediment by mixed culture bacteria and nutrient solution (experiment 3). In this study, the cytotoxicity study was performed on two kind of cell lines and the results indicated that the cytotoxicity on normal cells was higher than those on cancer cells. This may be explained by the fact that cancer cells contain higher activity of detoxification enzymes such as cytochrome P450 which are responsible for the metabolism of many foreign compounds than other human cell lines (Kang et al., 2010).

CONCLUSION

This study reveals that the addition of mixed culture bacteria and the nutrient solution did not enhance the degradation of PAHs. Highest PAHs removal was 86.19% of benzo[b]fluoranthene (BbF) by mixed culture bacteria. Addition of nutrient solution degraded high molecular PAHs of benzo[k]fluoranthene (BkF) with an efficiency of 61.38%. The microorganism in harbor sediment could degrade almost all of PAH compounds. Where the highest removal was 92.05 % for anthracene (An). The cell viability of normal cells (Clone9) was 71.73% with microorganisms in harbor sediment. The cancer cells viability was 93.16% with mixed culture bacteria.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Chia Nan University of Pharmacy and Science and National Marine Kaohsiung, Taiwan. The authors wish to express their gratitude to Chen Yu Tsai for their technical assistances in the cytotoxicity assay.

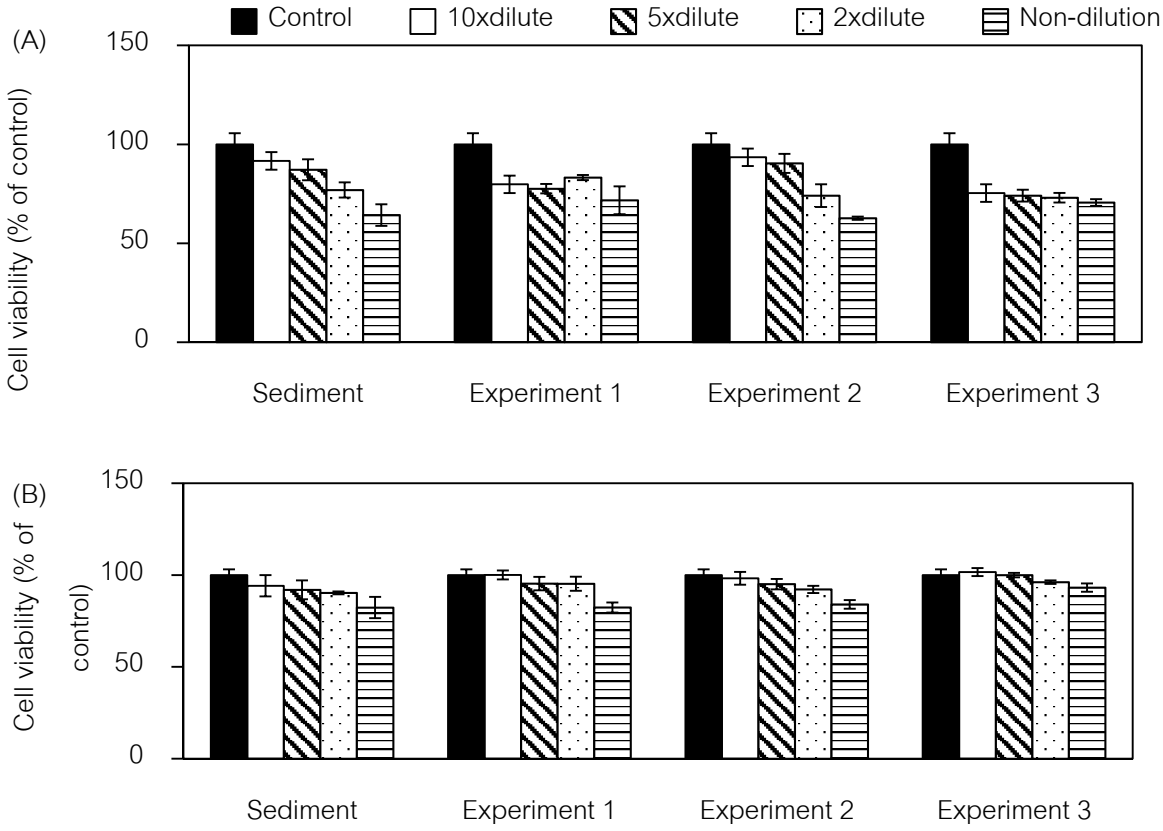


Figure 2 The cell viability of normal cells (Clone 9) and cancer cells (HepG2) in treated harbor sediment. (A; normal cells (Clone 9), B; cancer cells (HepG2)

REFERENCES

Bacosa, H. P. and Inoue C. 2015. Polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) biodegradation potential and diversity of microbial consortia enriched from tsunami sediments in Miyagi, Japan. **Journal of Hazardous Materials**. 283: 689-697.

Cachot, J., Geffard, O., Augagneur, S., Lacroix, S., Menachb, K. L., Peluhet, L., Couteau, J., Denier, X., Devier, M.H., Pottier, D. and Budzinski, H. 2006. Evidence of genotoxicity related to high PAH content of sediments in the upper part of the Seine estuary (Normandy, France). **Aquatic Toxicology**. 79: 257-267.

Chaîneau, C.H., Rougeux, G., Yéprémian, C. and Oudot, J. 2005. Effects of nutrient concentration on the biodegradation of crude oil and associated microbial populations in the soil. **Soil Biology & Biochemistry**. 37: 1490-1497

Chen, C.W. and Chen, C.F. 2011. Distribution, origin, and potential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in harbor sediment of Kaohsiung harbor, Taiwan. **Marine Pollution Bulletin**. 63: 417-423.

Dave, B.P., Ghevariya, C.M., Bhatt, J.K., Dudhagara, D.R. and Rajpara, R.K. 2014. Enhanced biodegradation of total polycyclic aromatic hydrocarbons (TPAHs) by marine halotolerant Achromobacter xylosoxidans using Triton X-100 and b-cyclodextrin–A microcosm approach. **Marine Pollution Bulletin**. 79: 123–129.

Deng, M.C., Li J., Liang, F.R., Yi, M., Xu, X.M., Yuan, J.P., Peng, J., Wu, C.F. and Wang, J.H. 2014. Isolation and characterization of a novel hydrocarbon-degrading bacterium Achromobacter sp. HZ01 from the crude oil-contaminated seawater at the Daya Bay, southern China. **Marine Pollution Bulletin.** 83: 79-86.

Desai, A. and Vyas, P. 2006. **Petroleum and Hydrocarbon Microbiology**. M.S. thesis, University of Baroda.

Dong, C.D., Chen, C.F. and Chen, C.W. 2014. Vertical profile, sources, and equivalent toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment cores from the river mouths of Kaohsiung Harbor, Taiwan. **Marine Pollution Bulletin.** 85: 665–671.

Gan, S., Lau, E.V. and Ng, H.K. 2009. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). **Journal of Hazardous Materials**. 172: 532-549.

Kanaly, R. A.and Harayama, S. 2000. Biodegradation of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria. **Journal of Bacteriology**. 182(8): 2059-2067.

Kang, Y., Cheung, K. C. and Wong, M. H. 2010. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different indoor dusts and their potential cytotoxicity based on two human cell lines. **Environment International**. 36: 542-547.

Park, S.Y., Lee, S.M., Ye, S.K., Yoon, S.H., Chung, M.H. and Choi, J. 2006. Benzo[a]pyrene-induced DNA damage and p53 modulation in human hepatoma HepG2 cells for the identification of potential biomarkers for PAH monitoring and risk assessment. **Toxicology Letters.** 167: 27-33.

Seo, J.S., Keum, Y.S. and Li, Q.X. 2009. Bacterial degradation of aromatic compounds. International **Journal of Environmental Research and Public Health**. 6: 278- 309.

Wei, W., Zhang, C., Liu, A.-L., Xie, S.-H., Chen, X.-M., Lua, W.-Q., 2009. Effect of PCB153 on BaP-induced genotoxicity in HepG2 cells via modulation of metabolic enzymes. **Mutation Research**. 675: 71-76.

Yuan, S.Y., Su, L.M., Chang, B. V., 2009. Biodegradation of phenanthrene and pyrene in compost-amended soil. **Journal of Environmental Science and Health Part A**. 44: 648-653.

Yuan, S.Y., Wei, S.H. and Chang, B.V. 2000. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by a mixed culture. **Chemosphere.** 41: 1463-1468.

Removal of Heavy Metals from Harbor Sediment by Bioleaching Process

Phakchira Klipkhayai[1*], Chia-Yuan Chang[2], Shen-Yi Chen[3], Dome Adoonsook[4] and Chart Chiemchaisri[1]

ABSTRACT

In this study, series of experiments were conducted to investigate the feasibility of bioleaching process for removing heavy metals from the contaminated sediments of Kaohsiung harbor. The performance of bioleaching process inoculated with indigenous bacteria acclimated from the harbor sediment was compared with that of previously acclimated bacteria from contaminated soils. The solubilization of heavy metals was clearly observed in this bioleaching process. The removal efficiencies of heavy metals in bioleaching experiments by these using inoculants from indigenous bacteria acclimated from the harbor sediment and exogenous bacteria acclimated from contaminated soils. Their removal efficiencies of heavy metals after 30 days were 100% for Zn, 73.95% for Pb, 77.3% for Ni, 62.56% for Cr and 93.67% for Cu and the optimum condition for this bioleaching experiment was 10 g/l of harbor sediment, 0.5 (%w/v) of sulfur and 10% (v/v) of inoculants. Highest removal efficiency of heavy metals in bioleaching experiment was achieved by exogenous bacteria acclimated from contaminated soils compared to the other bacteria from other three sources, for 30 days at the same optimum condition.

Key words: Bioleaching, Harbor sediment, Heavy metals, Indigenous bacteria, Sulfur-oxidizing bacteria,

*Corresponding author; e-mail address: Phakchi@hotmail.com

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900.

[2]Department of Environmental Engineering and Science, Chia Nan University of Pharmacy and Science, Tainan 71710, Taiwan.

[3]Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung First University of Science and Technology, Kaohsiung 824, Taiwan.

[4]Department of Environment Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200.

INTRODUCTION

Kaohsiung Harbor is the largest international harbor in Taiwan and faces the key trade waterway running through the Taiwan Straits and Bashi Channel. Kaohsiung Harbor is adjacent to Kaohsiung City, which is the largest industrial city in Taiwan. There are several industrial parks located in around Kaohsiung City that discharge an amount of untreated and/ treated wastewaters into the rivers and to the Kaohsiung Harbor (Chen et al., 2007). The sediments of Kaohsiung Harbor contaminated with lots of pollutants such as metals, nutrients, organic matter, PCB, dioxins, PAH, organ chloride pesticides, and organic carbon compounds. These chemicals are toxic to marine biota, therefore, should be treated to achieve low concentrations of the pollutants mentioned above.

Heavy metal concentrations in harbor sediments usually are very high due to significant anthropogenic metal loadings carried by the upstream of tributary rivers. The sediments serve as a metal pool that can release metals to the overlying water via natural or anthropogenic processes, causing potential adverse health effects to the ecosystems. Moreover, marine organisms or biota can uptake metals, which in turn enhances the potential of some metals entering into the food chain.

The bioleaching technology is considered as a low-cost, efficient and environmentally friendly approach for remediation of heavy metals contaminated harbor sediment. The bioleaching process is the oxidation by leaching bacteria or the acidification by bacteria metabolism the bacteria commonly used in the process are found to be genus *Acidithiobacillus* or *Thiobacillus*, such as *Acidithiobacillus ferrooxidans, Acidithiobacillus thiooxidans* and *Thiobacillus thioparus*. These bacteria are the sulfur-oxidizing bacteria could catalyze the bioleaching process through either direct oxidation and/or indirect acidification (Chen and Lin, 2010).

Bioremediation primarily uses microorganisms or microbial processes to degrade and transform pollutants into harmless and less toxic forms. Bioremediation has been developed as an environmentally friendly and cost-effective technology for the removal of metals from contaminated sediments. Among the biological technologies, bioleaching of heavy metals from contaminated sediment is far more popular. Bioleaching is defined as “the solubilization of metals from solid substrates either directly by the metabolism of leaching bacteria or indirectly by the products of metabolism” (Zhu et al., 2014).

In this study, series of experiments were conducted to investigate the feasibility of bioleaching process for removing heavy metals from the contaminated sediments of Kaohsiung harbor. Meanwhile, the performance of the bioleaching process inoculated with indigenous bacteria acclimated from the harbor sediment was compared with that of previously acclimated bacteria from contaminated soil (exogenous bacteria).

MATERIALS AND METHODS

1. Sediment samples

The sediment samples were obtained from Kaohsiung harbor in Taiwan. The surface sediment samples (0-15 cm) were collected using the 6 in. × 6 in. × 6 in. Ekman Dredge grab sampler (Jae Sung International Co., Taiwan), and stored in polyethylene bottles that had been washed with acid. The bottles were stored in a dark ice chest filled with crushed ice. After being transported back to the laboratory, a small portion of the sample was directed to analysis of water content at 105°C, and the remaining portion was preserved in air dry to be analyzed later. Prior to being analyzed, each sample was lightly crushed with a wooden board and then screened through 1 mm nylon net to remove particles with diameters larger than 1 mm and the characteristics of the contaminated sediment including sand (>63 μm) 19.4%, silt (2-63 μm) 73.4%, clay (<2 μm) 7.2%, oxidation-reduction potential (ORP) -329.3 mV, total organic carbon (TOC) 8.5%, Zn 906 (mg/kg dry weight), Ni 56 (mg/kg dry weight), Cu 687 (mg/kg dry weight), Pb 83 (mg/kg dry weight), Cr 127 (mg/kg dry weight).

2. Acclimation of sulfur-oxidizing bacteria from the harbor sediment (indigenous bacteria)

For acclimation, the indigenous sulfur-oxidizing bacteria were cultivated by the following procedures: In shaker batch reactor, 20 g of sediment was added to 1 L water. Subsequently, 0.5 (%w/v) of elemental sulfur was added to the batch reactor. The sediment suspension was mixed at 100 rpm by shaker bath and keep at room temperature. The pH of sediment suspension was measured on a daily basis. When pH dropped to about 2.0, the commonly used sulfur-oxidizing bacteria in bioleaching process were under the genus of either *Acidithiobacillus* or *Thiobacillus* such as *Acidithiobacillus ferooxidans, Acidithiobacillus thiooxidans* and *Thiobacillus thioparus.* Generally, *T. thioparus* is less-acidophilic and active in the pH range of 5.0 - 9.0 and *A. thiooxidans* belong to acidophilic bacteria which can grow at pH value below 4 (Chen and Lin, 2001). Then, 10 (%v/v) of sediment suspension was transferred to second reactor with 20 g of sediment was added to 1 L water and 0.5 (%w/v) of elemental sulfur operated at the same conditions. The acclimation procedure was repeated three times. And then the inoculants were used in the bioleaching experiment.

3. Acclimation of sulfur-oxidizing bacteria from contaminated soil (exogenous bacteria)

The exogenous sulfur-oxidizing bacteria in the soil were cultivated by the following procedures: In an acrylic batch bioreactor, 100 g of soil was added to 5 L water. Subsequently, 25 g of sterilized elemental sulfur (200-300 μm in diameter) was added to the bioreactor. The soil suspension was mixed at 200 rpm and aerated at a rate of 1.2 L air/min at 30 ๐C. The pH of soil suspension was measured on a daily basis. When pH dropped to 2.0, 150 ml of acclimated soil suspension was transferred to

seed 5 L of fresh soil suspension with 25 g of elemental sulfur in a second bioreactor operated at the same conditions. After the above procedures were repeated twice, the exogenous sulfur-oxidizing bacteria in soil suspension had the maximum activity of acidification, and then the acclimated sulfur-oxidizing bacteria were used as inoculants for the bioleaching experiments. The dominant sulfur-oxidizing bacteria acclimated in the inoculants were identified as *At. ferrooxidans*, *At. thiooxidans* and *T. thioparus* by a molecular technique called fluorescence in situ hybridization (FISH) (Chen and Lin, 2004). The results obtained by the FISH illustrated that the quantity of these three sulfur-oxidizing bacteria together accounts for 40-60% of total bacteria in the inoculants.

4. Bioleaching experiments

The bioleaching experiments were performed in a 1 L completely mixed batch reactors agitated by the shaker bath at 100 rpm and room temperature. In the bioleaching reactor with 4 different weight of sediment 10, 20, 30 and 40 g, respectively, were inoculated with 10% (v/v) of well acclimation inoculants and 0.5 (%w/v) of elemental sulfur were added to 1 L water and operated in 1 month. During the bioleaching experiments pH, was measured every day by online monitor (Suntex, model TS-1) and temperature of sample using on-line monitor (Suntex, model TS-100) was measured every day. A portion of sulfate and heavy metals analysis taken from the reactor was filtered through 0.45 μm membrane. Heavy metals (Zn, Ni, Cu, Pb, and Cr) were determined using inductively coupled plasma and sulfate analysis was carried out by using standard Methods 4500 (Turbid metric Method).

RESULTS AND DISCUSSION

1. Effect of harbor sediment concentration on pH variation during the bioleaching experiments

The effect of harbor sediment concentration on pH variation during 30 days bioleaching experiments is shown in Figure 1. The decrease of pH was due to the oxidation of elemental or reduced sulfur into sulfuric acid by the leaching bacteria, resulting in the acidification of the sediment. The experiment with lower harbor sediment amount had higher bacteria activity. The sediment with higher solids content had a higher buffering capacity, so it requires more time to produce acid for lowering the pH (Kim et al., 2005). Moreover, this was supported by Chen and Lin (2001) that pH decreases with an increasing sediment solid contents because of high buffering capacity of sediments containing high sediment solid content. Moreover, at 10 g/l of harbor sediment, the initial of pH was around at 3.65 because the pH of exogenous bacteria was 1.53 and have weight of 10 g of harbor sediment that lowest of harbor sediment so harbor sediment quantity low activity of bacteria will increase. However, the maximal growth of sulfur-oxidizing bacteria was observed between pH 2.5 and 4.0 (Blais et al., 1992). The growth of acidophilic *Thiobacillus* was inhibited at pH lower than 1.5 (Sreekrishana et al., 1993).

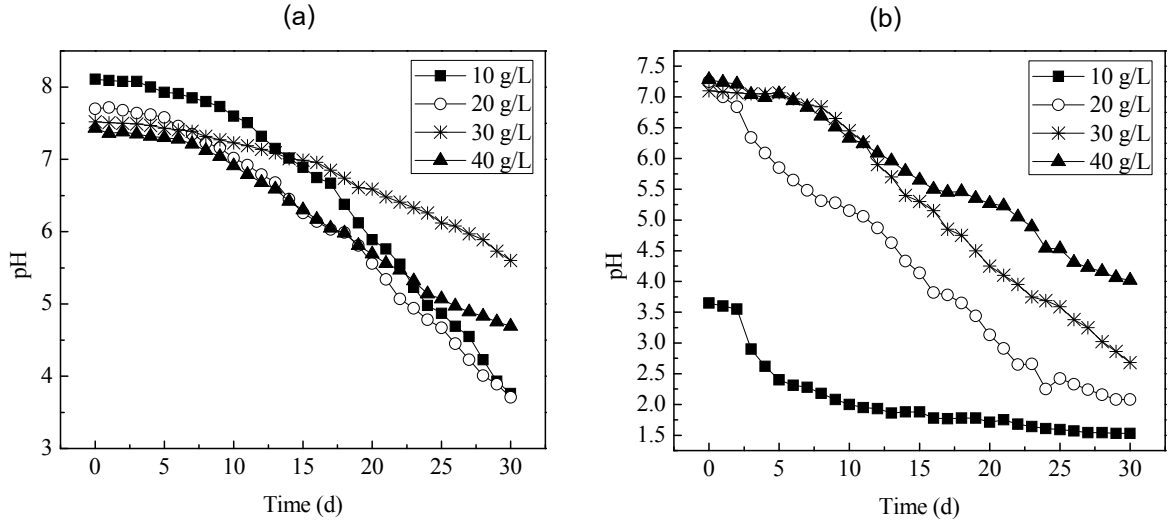


Figure 1 Effect of harbor sediment concentration on pH variation during the bioleaching experiments using (a) indigenous bacteria (b) exogenous bacteria.

2. Effect of sediment concentration on sulfate variation during the bioleaching experiments

Sulfate production during bioleaching experiments are an indicator for sulfur-oxidizing bacteria activity. Figure 2 shows the effect of harbor sediment concentration on sulfate variation during the 30 days bioleaching experiments. An increasing trend of sulfate with respect to increases amount of bacteria suggests that sulfur is oxidized to sulfuric acid by sulfur-oxidizing organisms (Zhu et al., 2014). An increasing trend of sulfate with respect to increasing amount bacteria could be due to more nutrients (N and P) are conserved in the sediment (Nareshkumar and Nagendran, 2008). At high sediment solids content, it was more favorable condition for the bacterial oxidation of sulfur and the sulfate concentration was increased linearly with time (Chen and Lin, 2001). In the bioleaching, the elemental sulfur and sulfide were oxidized therefore an increase in sulfate was observed. However, added sulfur was not completely oxidized during the bioleaching process. The unused elemental sulfur remaining in the treated sediment increases the operational costs and causes re-acidification potential of the treated sediment (Chen and Pan, 2010). The results of sulfate variation during the bioleaching experiments using indigenous bacteria were lower than using exogenous bacteria because pH of exogenous bacteria was lower than pH of indigenous bacteria which means the exogenous bacteria was stronger than indigenous bacteria if the pH of inoculants was lower, it was stronger of bacteria that why the trends of sulfate were different between using indigenous bacteria and exogenous bacteria.

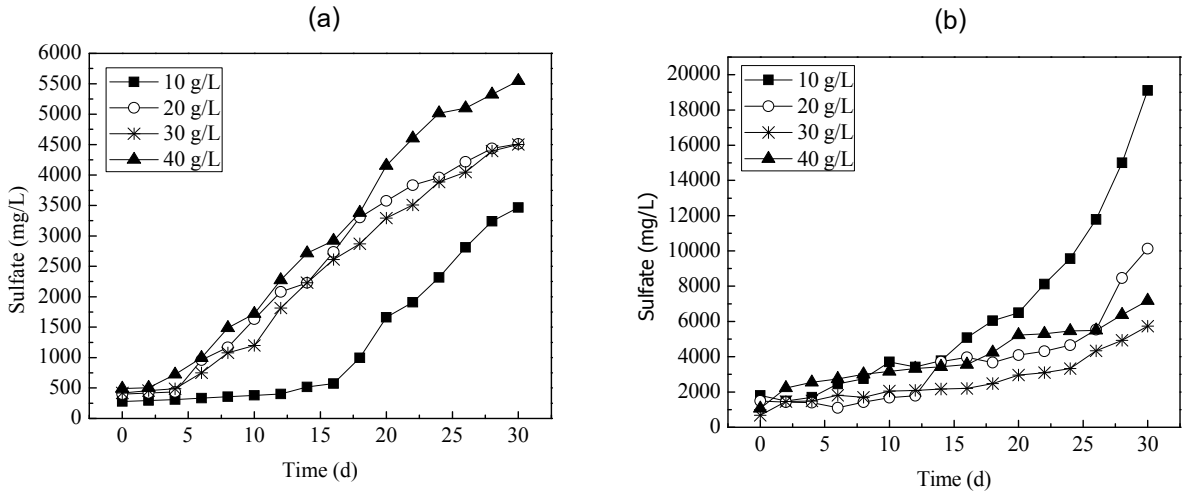


Figure 2 Effect of harbor sediment quantity on sulfate variation during the bioleaching experiments using (a) indigenous bacteria (b) exogenous bacteria.

3. Effect of sediment concentration to the removal of heavy metals during bioleaching experiments using indigenous bacteria and exogenous bacteria

The bioleaching experiments were operated for 30 days at different harbor sediment concentrations of 10, 20, 30, and 40 g/l while using different sources of bacteria to determine the removal efficiency of heavy metals (Zn, Pb, Ni, Cr, and Cu). Effects of sediment concentration to heavy metal removals during bioleaching experiments using indigenous bacteria and exogenous bacteria are shown in Table 1. The results suggest the removal efficiencies were decreasing with increasing harbor sediment concentrations due to low buffering capacity. The optimum dosage of harbor sediment in bioleaching experiments by using indigenous bacteria acclimated from the harbor sediment and using exogenous bacteria acclimated from contaminated soil was 10 g/l at which the removal efficiencies of heavy metals by using indigenous bacteria were 100% for Zn, 73.95% for Pb, 77.3% for Ni, 62.56% for Cr and 93.67% for Cu, and for exogenous bacteria the removal efficiencies of all heavy metals up to 100%. In this study, exogenous bacteria can achieve highest metal solubilization during bioleaching experiments because the exogenous bacteria contained sulfur-oxidizing bacteria as predominant microorganisms and they were acclimated in the inoculants which were identified as *At. ferrooxidans*, *At. thiooxidans* and *T. thioparus* by fluorescence in situ hybridization (FISH) (Chen and Lin, 2004). The results obtained by the FISH illustrates that the population of these three sulfur-oxidizing bacteria together accounts for 40-60% of total bacteria in the inoculants which suitable for bioleaching experiments.

Table 1 The removal efficiency of heavy metals during bioleaching between inoculants from indigenous bacteria and exogenous bacteria.

Bacteria	Sediment (g/L)	Heavy metals removal efficiency (%)				
		Zn	Pb	Ni	Cr	Cu
Exogenous bacteria (pH of inoculants 1.5)	10	100	100	100	100	100
	20	100	75.27	87.21	50.39	100
	30	86.45	29.93	64.74	16.22	81.18
	40	59.11	0	22.30	0	22.06
Indigenous bacteria (pH of inoculants 2.38)	10	100	73.95	77.30	62.56	93.67
	20	100	58.76	50.54	36.93	66.45
	30	60.33	26.41	42.94	14.19	55.95
	40	38.72	4.62	19.32	8.04	20.53

CONCLUSION

The bioleaching processes investigated in this study could effectively remove heavy metals from contaminated Kaohsiung Harbor sediment. It is one of the alternative methods for bioremediation on metal contaminated sediment. The results of this study indicate that the pH in bioleaching process decreases with the growth of *Acidithiobacillus* and *Thiobacillus* and the rate of pH change decreased due to high buffering capacity when high sediment solids contents were used. The removal efficiency of heavy metals by using inoculants from indigenous bacteria acclimated from the harbor sediment after 30 days were 100% for Zn, 73.95% for Pb, 77.3% for Ni, 62.56% for Cr and 93.67% for Cu and the removal efficiency in bioleaching experiments by using inoculants from exogenous bacteria acclimated from contaminated soils were up to 100% of all heavy metals (Zn, Ni, Cu, Pb, and Cr) after 30 days.

In this study, the highest removal efficiency of heavy metals in bioleaching experiment was achieved by exogenous bacteria acclimated from contaminated soils compared to the bacteria from other two sources During 30 days bioleaching experiment, with optimum condition was 10 g/l of harbor sediment, 0.5 (%w/v) of sulfur and 10% (v/v) of inoculants.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Department of Safety, Health, and Environmental Engineering, National Kaohsiung First University of Science and Technology, Taiwan for supporting heavy metals analysis by ICP.

REFERENCES

Blais, J.F., Auclair, J.C. and Tyagi, R.D. 1992. Cooperation between two Thiobacillus strains for heavy-metal removal from municipal sludge. **Canadian Journal of Microbiology**. 38: 18 1-1 87.

Chen, C.W., Kao, C.M., Chen, C.F. and Dong, C.D. 2007. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. **Chemosphere**. 66: 1431–1440

Chen, S.Y. and Lin, J.G. 2001. Bioleaching of heavy metals from sediment: significance of pH. **Chemosphere**. 44: 1093-1102.

Chen, S.Y. and Lin, J.G. 2001. Effect of Substrate Concentration on Bioleaching of Metal-Contaminated Sediment. **Journal of Hazardous Materials**. B28: 77-89.

Chen, S.Y. and Lin, J.G. 2004. Bioleaching of heavy metals from contaminated sediment by indigenous sulfur-oxidizing bacteria in an airlift bioreactor: effects of sulfur concentration. **Water Research**. 38: 3205-3214.

Chen, S.Y. and Lin, P.L. 2010. Optimization of Operating Parameters for the Metal Bioleaching Process of Contaminated Soil. **Separation and Purification Technology**. 71: 178-185.

Chen, S.Y. and Pan, S.H. 2010. Simultaneous metal leaching and sludge digestion by thermophilic microorganisms: Effect of solids content. **Journal of Hazardous Materials**. 179: 340–347.

Kim, S., Lee, J.U. and Jang, A. 2005. Bioleaching of heavy metals from dewatered sludge by *Acidithiobacillus ferrooxidans* **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**. 80: 1339–1348.

Nareshkumar, R. and Nagendran, R. 2008. Changes in nutrient profile of soil subjected to bioleaching for removal of heavy metals using *Acidithiobacillus thiooxidans*. **Journal of Hazardous Materials**. 156: 102–107.

Sreekrishnan, T.R., Tyagi, R.D., Blais, J.F. and Campbell, P.G.C. 1993. Kinetics of heavy metal bioleaching from sewage sludge-I. Effect of process parameters. **Water Research**. 27: 1641-1651.

Zhu, Y.J., Zhang, X.J., Li, Q., Han, T., Hu, H.Y., Liu, D.X., Qin, Q.W., Chai, Y.L. and Qiu, Z.G. 2014. Bioleaching of heavy metals from contaminated alkaline sediment by auto and heterotrophic bacteria in stirred tank reactor. **Nonferrous Metals Society of China**. 24: 2969-2975.

การพัฒนารูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่าง เพื่อการส่องสว่างที่เหมาะสม สำหรับห้องเรียนของโรงเรียนมัธยม

The Development of Light Guiding Shade System for Appropriate Illumination in Classroom of Secondary School

ณัฏฐ์ธมล พุ่มจันทร์[1*] นวลวรรณ ทวยเจริญ[1] และ ศิรเดช สุริต[1]

Natthamol Phumchan[1*], Nuanwan Tuaycharoen[1] and Siradech Surit[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่าง (light guiding shade) เพื่อการส่องสว่างที่เหมาะสม สำหรับห้องเรียนของโรงเรียนมัธยม ซึ่งมีการใช้งานตั้งแต่เวลา 08:00-16:00 น. เพื่อเปรียบเทียบค่าการส่องสว่าง และความสม่ำเสมอของแสง จากรูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่าง 9 รูปแบบ โดยใช้โปรแกรม DIALux 4.12 ทำการจำลองห้องตัวอย่าง ห้องเรียนของโรงเรียนมัธยม 45 ที่นั่ง ขนาด 6.00 x 8.00 เมตร สูง 3.50 เมตร มีช่องเปิดด้านเดียวที่หันไปทางด้านทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก โดยไม่มีอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร ในสภาพท้องฟ้าแบบโปร่ง (clear sky) ทดสอบตัวแปรต้น 2 ปัจจัย ได้แก่ ความโค้งของแผงกันแดดที่ 10°, 30°, 60° และ ขนาดช่องแสงที่ 10, 20, 30 เซนติเมตร ผลการศึกษาสรุปได้ว่าผลของค่าการส่องสว่างจากรูปแบบทั้งหมดมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน โดยรูปแบบแผงกันแดดที่มีความโค้งของแผงกันแดดที่ 10° และช่องแสงที่ 30 เซนติเมตร ก่อให้เกิดความสม่ำเสมอของแสงในห้องเรียนของโรงเรียนมัธยมที่สูงสุด

ABSTRACT

The purpose of this research is to explore the characteristic of Light Guiding Shade system (LGS) for appropriate Illumination in classrooms of a secondary school. The study carried out the values of illuminance and uniformity from 9 types of LGS during 08:00 am to 4:00 pm using DIALux 4.12 software. The investigated classroom has 45 seats, size 6.00 m wide x 8.00 m long with 3.50 m high. The one-side openings were oriented at north, south, east and west, without influence from the outside environment. There are two independent variables. The first one is the curve of the shading element which are varied from 10°, 30°, 60° from horizontal. The second variable is the inside light gap width of 10, 20, 30 cm. The advantage of LGS is the ability to bring daylight into the classroom. In conclusion, all 9 types could bring Illuminance level higher than the standard values. The best option of LGS that can create the highest value of uniformity in classrooms for all orientation is a curve of shade at 10° from horizon with a light gap width of 30 cm.

Keyword: light guiding shade system, daylighting, classroom of secondary school

*Corresponding author; e-mail address: Toey_phumchan@hotmail.com

[1]สาขาวิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ ฯ 10900

[1]Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การใช้ไฟฟ้าในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากความต้องการของผู้บริโภคที่มากขึ้น การใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการใช้ทรัพยากรในการผลิตไฟฟ้า ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มขึ้น (global warming) โรงเรียนมัธยมศึกษาถือว่าเป็นสถานศึกษา ที่มีจำนวนมากถึงร้อยละ 40 ของสถานศึกษาทั้งหมด (กระทรวงศึกษาธิการ, 2558) การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่างในสถานศึกษา คิดเป็นร้อยละ 10-30 ของพลังงานที่ใช้ภายในอาคารประเภทสถานศึกษาทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2548)

จากการสำรวจเบื้องต้นจากกรณีศึกษา โดยการใช้ลักซ์มิเตอร์ และประเมินคุณภาพแสงด้วยสายตา ตั้งแต่เวลา 08:00-16:00 น. พบว่าภายในห้องเรียนของโรงเรียนมัธยมมีปัญหาแสงแดดโดยตรงเข้ามาในอาคาร ทำให้แสงสว่างในส่วนที่ใกล้กับหน้าต่างนั้นสว่างเกินไปในขณะที่แสงสว่างไม่เพียงพอต่อการใช้งานในบริเวณที่ไกลจากหน้าต่าง และมีแสงบาดตา (glare) จากหน้าต่างที่ค่อนข้างรุนแรง

แผงกันแดดแบบนำแสงสว่าง (light guiding shade) คือ ระบบการบังแดดภายนอกอาคาร ซึ่งจะทำหน้าที่กันแดดและสะท้อนแสงแดดและแสงจากท้องฟ้าขึ้นไปบนฝ้าเพดานของอาคาร ดังนั้นจะมีศักยภาพทั้งในการกันแสงแดดและเป็นการเปลี่ยนเส้นทางแสงแดดเพื่อนำแสงแดดดังกล่าวมาใช้เป็นการส่องสว่างภายในอาคารและเป็นการลดการใช้แสงประดิษฐ์และช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างในอาคารได้ นอกจากนี้ยังเป็นการลดแสงบาดตาในส่วนช่องเปิดของหน้าต่างอีกทางหนึ่ง

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างจากแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคาร เพื่อการส่องสว่างที่เหมาะสมสำหรับห้องเรียนของโรงเรียนมัธยมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ DIALux 4.12 จำลองห้องเรียน โดยคำนึงถึงการใช้แสงธรรมชาติที่เหมาะสม ผลการวิจัยนี้นำมาปรับปรุงอาคารสถานศึกษา และประยุกต์ใช้กับอาคารอื่นๆ เพื่อลดปัญหาการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากเกินไปในระบบแสงสว่างและเพื่อการใช้แสงสว่างที่เพียงพอต่อกิจกรรมที่เกิดขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุอุปกรณ์ (Materials and Equipment)

การศึกษาในเรื่องการรูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่าง (light guiding shade) เพื่อการส่องสว่างที่เหมาะสม สำหรับห้องเรียนของโรงเรียนมัธยมโดยมีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- การออกแบบรูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่าง (light guiding shade) โดยใช้โปรแกรม SketchUp Make
- การจำลองสภาพแวดล้อมห้องเรียน และหาค่าการส่องสว่าง (illuminace) และความสม่ำเสมอของแสง (uniformity) โดยใช้โปรแกรม DIALux 4.12

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาขั้นตอนที่ 1 พิจารณารูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างที่เป็นไปได้ สำหรับการใช้เปรียบเทียบปริมาณการส่องสว่าง (illuminance) และค่าความสม่ำเสมอของแสง (uniformity) ในห้องเรียนของโรงเรียนมัธยม โดยการนำค่าการส่องสว่างและค่าความสม่ำเสมอของแสงมาหาค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี และนำไป

เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน TIEA สำหรับห้องเรียนได้กำหนดค่ามาตรฐานความส่องสว่าง คือ 500 lux และค่าความสม่ำเสมอ คือ 0.8 (TIEA, 2001)

แผงกันแดดแบบนำแสงสว่าง (light guiding shade, LGS) คือ ระบบการบังแดดภายนอกอาคาร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเส้นทาง (redirects) ของแสงจากดวงอาทิตย์ และแสงจากท้องฟ้าบนฝ้าเพดาน

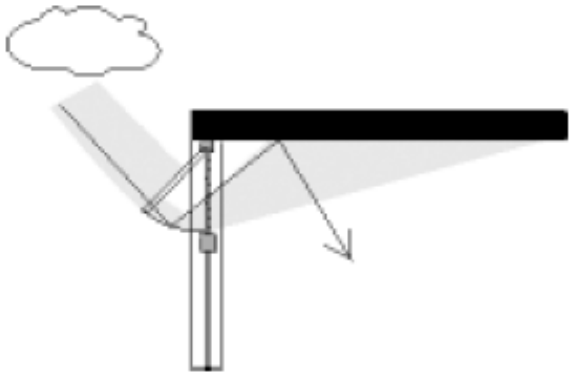


Figure 1 light guiding shade (International Energy Agency, 2000)

แผงกันแดดแบบนำแสงสว่าง ประกอบด้วย ช่องที่รับแสง และส่วนที่ออกแบบเพื่อการสะท้อนแสง โดยการกระจายแสง จากช่องรับแสงเข้าอาคารโดยการกำหนดมุม ซึ่งมุมที่กระจายแสงในอาคาร ได้ออกแบบไว้ที่ประมาณ 60° เพื่อหลีกเลี่ยงแสงจ้า และช่วยให้บังร่มเงาของหน้าต่างจากรังสีโดยตรงของดวงอาทิตย์ โดยตำแหน่งการติดตั้ง ติดตั้งแผงกันแดดแบบนำแสงสว่างไว้ด้านบน หรือ ครึ่งหนึ่งของหน้าต่าง

ในภูมิอากาศแบบกึ่งเขตร้อน (subtopical) หน้าต่างอาคารส่วนใหญ่จะถูกบังแดดโดยชายคาที่มีขนาดกว้าง ดังนั้นแสงธรรมชาติที่ผ่านเข้ามาจากหน้าต่างจึงลดลงในปริมาณมาก แสงธรรมชาติในอาคารกึ่งเขตร้อนมีระดับแสงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งที่ไม่ได้มีการติดตั้งแผงบังแดดให้กับหน้าต่างใด ๆ ทั้งสิ้น ดังนั้นการนำแสงสว่างเข้าไปในอาคารโดยใช้รูปแบบแผงกันแดด ต้องมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของแผงกันแดด เพื่อไม่ให้เกิดแสงจ้าและเพื่อให้แสงธรรมชาติเข้าไปในส่วนที่ลึกของห้องได้ ทั้งหมดนี้คือวัตถุประสงค์หลักของแผงกันแดดแบบนำแสงสว่าง

Figure 2 General shading (left) compared to light guiding shade (right) (International Energy Agency, 2000)

Figure 2 เปรียบเทียบความส่องสว่างของห้องที่ติดตั้งแผงกันแดดแบบเดิม และ ห้องติดตั้งแผงกันแดดแบบนำแสงสว่างที่มีขนาดคล้ายกัน ซึ่งเห็นได้ชัดว่าการใช้แผงกันแดดแบบนำแสงสว่างเพื่อเพิ่มแสงธรรมชาติช่วยปรับปรุงให้สภาพแสงในห้องดีขึ้นและไม่มีแสงจ้าจากหน้าต่าง เมื่อใช้แผงกันแดดแบบนำแสงสว่าง ฝ้าเพดานที่

สะท้อนแสงจะทำให้แสงกระจายได้ทั่วห้อง ซึ่งแผงกันแดดแบบเดิม มีความสว่างบริเวณที่หน้าต่างเพียงอย่างเดียว

ในด้านการประหยัดพลังงาน แผงกันแดดแบบนำแสงสว่างมีจุดเด่นและได้ผลดีกว่าแผงกันแดดทั่วไป ซึ่งสามารถลดแสงแดดที่เข้ามาภายในอาคารโดยได้รับการออกแบบเพื่อไม่ให้แสงแดดส่องเข้าโดยตรง โดยปกติค่าเฉลี่ยของแสงธรรมชาติในห้องที่มีหน้าต่างมีค่าความส่องสว่างน้อยกว่า 50 lux ภายใต้ท้องแบบไม่มีเมฆ (clear sky) แผงกันแดดแบบนำแสงสว่างสามารถทำให้ความส่องสว่างในห้องสูงขึ้นได้มากกว่า 1000 lux ในห้องที่มีความลึก 5 เมตร ภายใต้ท้องฟ้าที่เมฆมาก

การศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ดังต่อไปนี้

ตัวแปรต้น ประกอบด้วย ทิศทางของหน้าต่าง 4 ทิศทาง คือ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก ความโค้งของแผงกันแดดที่ 10^{o}, 30^{o}, 60^{o} และ ขนาดของช่องแสงที่ 10 cm, 20 cm, 30 cm ซึ่งตัวแปรต้นในการศึกษาครั้งนี้ ได้เลือกนำมาศึกษาเนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีการศึกษาของ LGS กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ และ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิผลต่อการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคารได้สูง (International Energy Agency, 2000)

Table 1 Cases of Light Guiding Shade System

	curve of shade	light gap
Base Case: No shading system	-	-
Option 1	10^{o}	10 cm
Option 2	10^{o}	20 cm
Option 3	10^{o}	30 cm
Option 4	30^{o}	10 cm
Option 5	30^{o}	20 cm
Option 6	30^{o}	30 cm
Option 7	60^{o}	10 cm
Option 8	60^{o}	20 cm
Option 9	60^{o}	30 cm

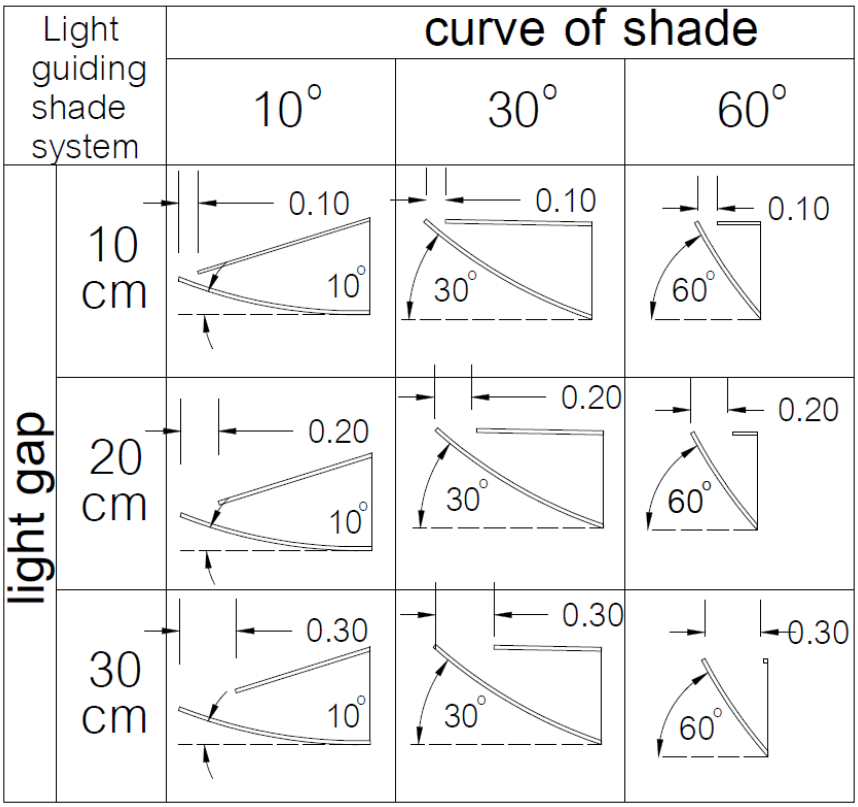


Figure 3 Section of Light Guiding Shade System

ตัวแปรตาม ประกอบด้วย ปริมาณค่าของการส่องสว่าง (illuminance) คือ ปริมาณแสงที่ตกกระทบพื้นที่ทำงาน และ ค่าความสม่ำเสมอของแสง (uniformity) คือ อัตราส่วนค่าความส่องสว่างตกกระทบพื้นที่ทำงานที่ต่ำสุดต่อค่าความส่องสว่างเฉลี่ยโดยในพื้นที่ที่ต้องการความส่องสว่าง

ตัวแปรควบคุม ประกอบด้วย ขนาดห้องเรียนของโรงเรียนมัธยม วันและเวลา และสภาพท้องฟ้า

ขั้นตอนที่ 2 ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของแสงสว่างจากรูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่าง (light guiding shade) ที่กำหนดในโปรแกรม DIALUX 4.12 โดยจำลองรูปแบบทั้งหมด 9 รูปแบบ ใน 4 ทิศทาง โดยจำลอง ณ วันที่ 21 มีนาคม 2560, 21 กันยายน 2560, 21 มิถุนายน 2560, และ 21 ธันวาคม 2560 ในสภาพท้องฟ้าแบบโปร่ง (clear sky) เนื่องจากเป็นสภาพท้องฟ้าที่ก่อให้เกิดปัญหาที่เกิดแสงแดดมากที่สุด ตั้งแต่ 08:00-16:00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่มีการเรียนการสอนปกติ

ขั้นตอนที่ 3 การนำผลที่ได้จากการศึกษาขั้นตอนที่ 3 ที่ได้จากการจำลองโปรแกรม DIALUX 4.12 นำมาสรุปรูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างที่เหมาะสมต่อห้องเรียนของโรงเรียนมัธยม

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการศึกษาวิจัยห้องเรียนของโรงเรียนมัธยม ด้วยโปรแกรม DIALUX 4.12

1.ผลการศึกษาของค่าการส่องสว่างของแสงเฉลี่ยทั้งปี

Figure 4 แสดงค่าความส่องสว่าง (lux) จากรูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างเมื่อช่องเปิดหันทางด้านทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และตะวันตกเฉลี่ยทั้งปี

เมื่อช่องเปิดหันทางด้านทิศเหนือ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการติดแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างจะมีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีสูงกว่ามาตรฐานขั้นต่ำทุกรูปแบบ โดยค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีที่สูงสุดคือรูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 9 โดยมีค่าความส่องสว่างที่ 951.80 lux และค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีที่ต่ำสุดคือรูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 2 โดยมีค่าความส่องสว่างที่ 637.85 lux

เมื่อช่องเปิดหันทางด้านทิศใต้ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการติดแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างจะมีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีสูงกว่ามาตรฐานขั้นต่ำทุกรูปแบบ โดยค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีที่สูงสุดคือรูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 7 โดยมีค่าความส่องสว่างที่ 2,048.30 lux และค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีที่ต่ำสุดคือรูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 2 โดยมีค่าความส่องสว่างที่ 1,011.80 lux

เมื่อช่องเปิดหันทางด้านทิศตะวันออก ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการติดแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างจะมีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีสูงกว่ามาตรฐานขั้นต่ำทุกรูปแบบ โดยค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีที่สูงสุดคือรูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 9 โดยมีค่าความส่องสว่างที่ 2,546.05 lux และค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีที่ต่ำสุดคือรูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 2 โดยมีค่าความส่องสว่างที่ 1,598.30 lux

เมื่อช่องเปิดหันทางด้านทิศตะวันตก ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการติดแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างจะมีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีสูงกว่ามาตรฐานขั้นต่ำทุกรูปแบบ โดยค่าความส่องสว่างที่สูงสุดคือรูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 9 โดยมีค่าความส่องสว่างที่ 2,309.05 lux และค่าความส่องสว่างที่ต่ำสุดคือรูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 2 โดยมีค่าความส่องสว่างที่ 1,261.70 lux

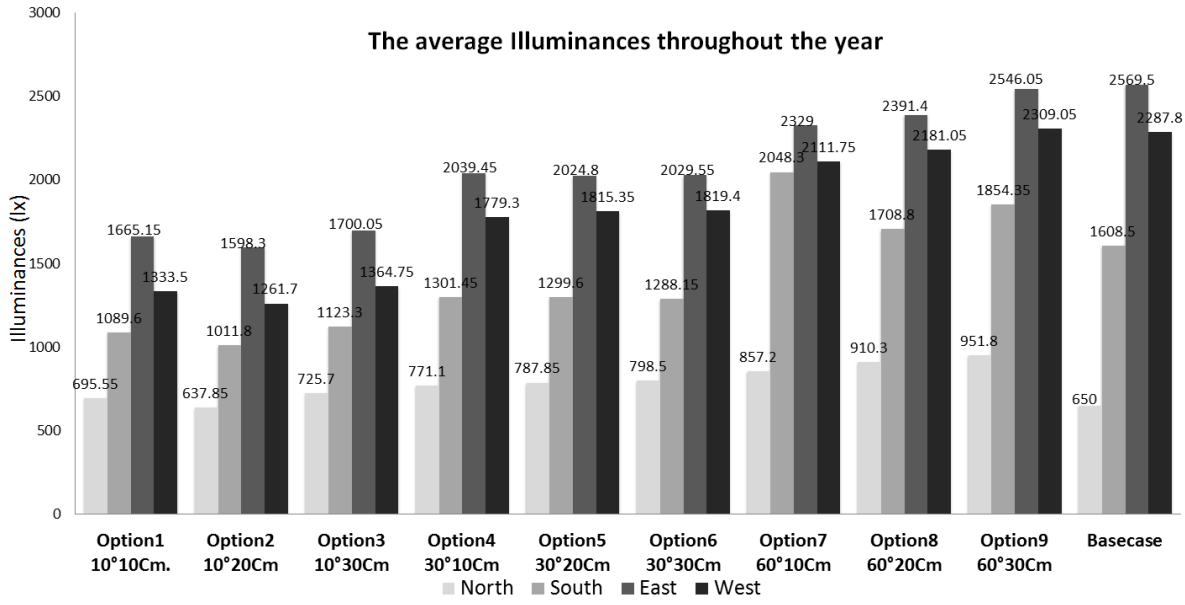


Figure 4 The average illumination throughout the year.

2.ผลการศึกษาของค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปี

Figure 5 แสดงความสม่ำเสมอของแสง (U) จากรูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างเมื่อช่องเปิดหันทางด้านทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และตะวันตกเฉลี่ยทั้งปี

เมื่อช่องเปิดหันทางด้านทิศเหนือ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการติดแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างจะมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุด 0.595 คือ รูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 3 และมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีต่ำที่สุด 0.530 คือ รูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 7

เมื่อช่องเปิดหันทางด้านทิศใต้ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการติดแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างจะมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุด 0.535 คือ รูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 3 และมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีต่ำที่สุด 0.479 คือ รูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 7

เมื่อช่องเปิดหันทางด้านทิศตะวันออก ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการติดแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างจะมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุด 0.479 คือ รูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 3 และมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีต่ำที่สุด 0.436 คือ รูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 9

เมื่อช่องเปิดหันทางด้านทิศตะวันตก ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการติดแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างจะมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีสูงที่สุด 0.497 คือ รูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 3 และมีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีต่ำที่สุด 0.435 คือ รูปแบบแผงกันแดดแบบที่ 9

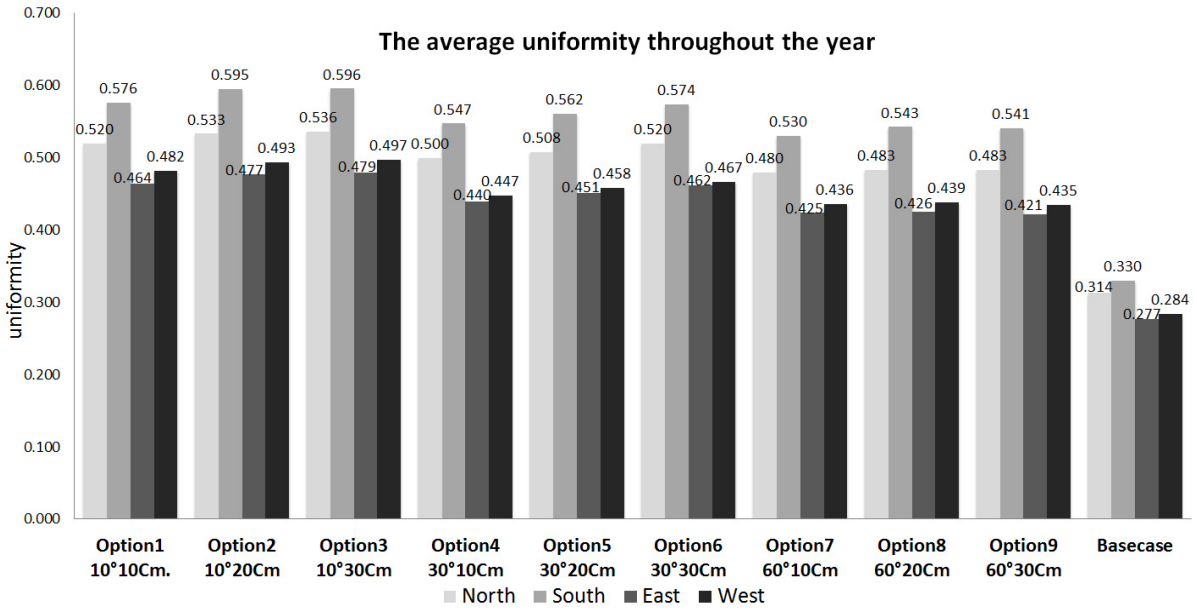


Figure 5 The average lighting uniformity throughout the year

สรุปผลและเสนอแนะ

วัตถุประสงค์หลักในการศึกษาครั้งนี้คือเพื่อศึกษาและพัฒนารูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างเพื่อการส่องสว่างที่เหมาะสมภายในห้องเรียนของโรงเรียนมัธยม ผลการศึกษาสรุปได้ว่ารูปแบบระบบแผงกันแดดแบบการนำแสงสว่างทั้ง 9 รูปแบบก่อให้เกิดค่าความส่องสว่างเฉลี่ยตลอดทั้งปีที่สูงกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำความส่องสว่างของห้องเรียน อย่างไรก็ตามรูปแบบแผงกันแดดที่ก่อให้เกิดความสม่ำเสมอของแสงที่สูงที่สุดใน

การนำแสงเข้ามาใช้ในห้องเรียนของโรงเรียนมัธยมในทุกด้าน คือแผงกันแดดที่มีความโค้งของแผงกันแดดที่ 10° และช่องแสงที่ 30 cm โดยรูปแบบแผงกันแดดแบบการนำแสงดังกล่าวสามารถนำไปติดตั้งกับอาคารเรียนในรูปแบบที่ทำการศึกษาและปรับใช้กับอาคารในลักษณะอื่นที่มีรูปแบบที่คล้ายๆ กัน โดยจะสามารถแก้ปัญหาในด้านของแสงสว่างที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน แก้ไขปัญหาแสงบาดตาที่รุนแรงจากหน้าต่างทำให้ลดแสงบาดตาที่เกิดขึ้น และช่วยประหยัดพลังงานการใช้ไฟฟ้าในระบบส่องสว่างซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของประเทศไทยในปัจจุบันได้

การศึกษาในครั้งนี้ได้ศึกษาห้องเรียนของโรงเรียนมัธยมโดยเก็บข้อมูลเฉพาะเวลา 08:00-16:00 น. ในช่วงสภาพท้องฟ้าแบบโปร่ง (clear sky) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องครบถ้วนในการศึกษาครั้งต่อไปควรจะมีการเก็บข้อมูลช่วงเวลาอื่นๆ และสภาพท้องฟ้าที่แตกต่างออกไป เช่น ท้องฟ้าที่มีเมฆมาก (overcast sky) หรือท้องฟ้าแบบมีเมฆบางส่วน (partly cloudy)

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน กระทรวงศึกษาธิการ. 2558. **รายงานประจำปี 2558**. 159 หน้า.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2550. **คู่มือชุดความรู้ การอนุรักษ์พลังงานสำหรับสถานศึกษา**. พิมพ์ครั้งที่ 1.

International Energy Agency. 2000. **Daylight in buildings a source book on daylighting systems and components a report of IEA SHC Task 21 /ECBCS Annex 29**.

สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย TIEA . 2001. **มาตรฐานระดับความส่องสว่าง ภายในอาคาร**. 28 .

ปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่

Factors Affecting the Success of Large Scale Construction Projects

ชัยชนะ ชิดช่วงชัย[1*] สุธาริน สถาปิตานนท์[1] และ วิโรจน์ รุโจปการ[1]

Chaichana Chidchuangchai[1*], Sutharin Sthapitanonda[1] and Wiroj Rujopakarn[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้รวบรวมความคิดเห็นของบุคลากรและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการรถไฟฟ้าและทางด่วนจากหน่วยงานราชการและเอกชน ได้แก่ การทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) กรมทางหลวง สำนักการจราจรและขนส่ง และ บริษัท รถไฟฟ้า รฟท. จำกัด ผ่านแบบสอบถามจำนวน 118 ตัวอย่าง จากนั้นทำการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ในประเทศไทย ประกอบด้วย 7 ปัจจัย คือ 1) ปัจจัยด้านการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ 2) ปัจจัยด้านการวางแผนและออกแบบ 3) ปัจจัยด้านนโยบาย 4) ปัจจัยด้านการควบคุมและการดำเนินการ 5) ปัจจัยด้านผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ 6) ปัจจัยด้านผลกระทบต่อสังคม และ 7) ปัจจัยด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อทำการวิเคราะห์ดัชนีความสำคัญ พบว่าปัจจัยด้านผลกระทบต่อสังคมเป็นปัจจัยที่มีความมีความสำคัญมากที่สุด

ABSTRACT

This research aims to study factors affecting the success of large scale construction projects in Thailand. The data of 118 samples were gathered from the personnel and involved in the electric train and expressway projects from the government and private sectors, namely the Expressway Authority of Thailand (EXAT), Mass Rapid Transit Authority of Thailand (MRTA), Department of Highways, Bureau of Traffic and Transportation and the Rapid Transit Authority of Thailand. The exploratory factor analysis found that the main factors affecting the success of large construction projects were 7 factors, namely, 1) project feasibility analysis, 2) planning and design, 3) policy, 4) control and operation, 5) economic return, 6) social impact and 7) environment impact. The most important factor is the impact on the society.

Key Words: success factor, large-scale project, construction

*Corresponding author; e-mail address: Chaichana_Chid@hotmail.com

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ซึ่งมีวงเงินลงทุนมากกว่า 1,000 ล้านบาท เป็นจำนวนมาก โครงการลักษณะนี้มีความซับซ้อนจึงทำให้อาจประสบปัญหาในด้านต่างๆ เช่น ด้านการวางแผนโครงการ นโยบาย การเงิน สังคม สิ่งแวดล้อม และการดำเนินการ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่โดยใช้การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจจากนั้นจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการ โดยใช้การวิเคราะห์ดัชนีความสำคัญ ผลการศึกษาช่วยให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาโครงการโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่หรือโครงการอื่นที่คล้ายคลึงเพื่อให้โครงการประสบความสำเร็จสูงขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความสำเร็จของโครงการเกิดจากหลายปัจจัยที่ทำให้โครงการสามารถดำเนินงานไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพัฒนาแนวคิดสำหรับการกำหนดตัวแปรนี้ได้จากงานวิจัยที่ผ่าน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Roger Allport *et al.* (2008) ใช้การวิเคราะห์ความถดถอยหาปัจจัยความสำเร็จของโครงการด้านการขนส่งสาธารณะในเขตเมืองจากโครงการรถไฟฟ้า 22 โครงการใน 12 เมือง 9 ประเทศ โดยสามารถแบ่งปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จออกเป็น 6 ปัจจัย คือ สภาพแวดล้อมและปัญหาของโครงการ การสนับสนุนและการควบคุมทางการเมือง บทบาทของรัฐบาล ประสิทธิภาพของการวางแผน และประสิทธิภาพของการจัดซื้อและการจัดหาเงินทุน พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จ คือ ประสิทธิภาพของการวางแผนและประสิทธิภาพของการจัดซื้อและการจัดหาเงินทุน

Albert *et al.* (2004) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง โดยรวบความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างแบ่งเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ ปัจจัยด้านการบริหารโครงการ ปัจจัยด้านสัญญา ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ และปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมภายนอกของโครงการ

Liyin Shen *et al.* (2010) ใช้การวิเคราะห์ดัชนีความสำคัญเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในการดำเนินการด้านการจัดการก่อสร้างอย่างยั่งยืน พบว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดความยั่งยืนในโครงการก่อสร้างมีด้วยกัน 3 ปัจจัย คือ ปัจจัยด้านประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์ ปัจจัยด้านประสิทธิภาพทางสังคม และปัจจัยด้านประสิทธิภาพทางสิ่งแวดล้อม

Syed *et al.* (2012) ศึกษาสมมุติฐานที่ว่าความสำเร็จของโครงการได้รับอิทธิพลมาจากลักษณะความสำเร็จ โดยใช้แบบจำลองสมการโครงสร้าง ซึ่งลักษณะความสำเร็จนั้นถูกแบ่งออกเป็น 2 องค์ประกอบ คือ ปัจจัยด้านมนุษย์ และปัจจัยด้านการจัดการ พบว่าปัจจัยด้านมนุษย์นั้นมีบทบาทสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการ

อภิญญา และคณะ (2017) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างอาคารสูง โดยการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจและจัดลำดับความสำคัญจากการวิเคราะห์ดัชนีความสำคัญ พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง ประกอบด้วย 4 ปัจจัย คือ ปัจจัยทั่วไปของโครงการ ปัจจัยการจัดสรร

เครื่องจักรและวัสดุอุปกรณ์ ปัจจัยด้านการบริหารโครงการ และปัจจัยด้านผลการปฏิบัติงาน โดยปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด คือปัจจัยด้านผลการปฏิบัติงาน

วิธีดำเนินการวิจัย

การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลในการวิจัยรวบรวมจากวิศวกรอาวุโส และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการรถไฟฟ้าและทางด่วนจากหน่วยงานราชการและเอกชน ซึ่งได้แก่ การทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) กรมทางหลวง สำนักการจราจรและขนส่ง และ บริษัท รถไฟฟ้า รฟท. จำกัด ผ่านแบบสอบถามจำนวน 118 ตัวอย่าง โดยใช้ Likert scale แบ่งระดับความคิดเห็นเป็น 5 ระดับตั้งแต่ 1 (ไม่มีผล) ถึง 5 (มากที่สุด) ทั้งนี้แบบสอบถามมีความตรงเชิงโครงสร้างและความน่าเชื่อถือ (Cronbach's Alpha) เท่ากับ 0.938

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis : EFA) ทำเพื่อจัดกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน โดยสกัดปัจจัยด้วยวิธีวิเคราะห์ปัจจัยหลัก (Principle Component Analysis) การหมุนแกนปัจจัยแบบมุมฉากด้วยวิธีแวริแมกซ์ (Varimax Method) และตั้งชื่อให้สอดคล้องกับปัจจัย

ดัชนีความสำคัญ (Importance Index) (Hany *et al*., 2012) ใช้จัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการ โดยการคำนวณจากความถี่ในการตอบแบบสอบถาม ดังในสมการที่ 1

$$Importance\ Index = \frac{[\Sigma(aX)]\times 100}{5} \qquad (1)$$

โดย a คือ ค่าคงที่แสดงถึงคะแนนของแต่ละคำตอบ คำตอบมีค่าระหว่าง 1 (ไม่มีผล) ถึง 5 (มากที่สุด) และ X =n/N โดย n คือ ความถี่ของคำตอบนั้น และ N คือ ผลรวมความถี่ของจำนวนคำตอบทั้งหมด ดัชนีความสำคัญของปัจจัยแต่ละกลุ่มคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยดัชนีความสำคัญของตัวแปรภายในปัจจัยนั้น

ผลการศึกษา

การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ

1. การทดสอบข้อมูล

ผลการทบสอบความเหมาะสมของกลุ่มตัวแปร พบว่าค่า Kaiser-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO) เท่ากับ 0.870 และ Value Anti-image Matrices (MSA) มีค่าระหว่าง 0.762 - 0.921 โดยผลการทดสอบ Bartlett's Test of Sphericity พบว่าตัวแปรต่างๆ มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.000 ซึ่งค่าทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่กำหนดดังต่อไปนี้ตามลำดับ KMO > 0.80 MSA > 0.05 และ Sig < 0.05 สุภมาศ และคณะ (2551) แสดงว่าตัวแปรชุดนี้มีความเหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์ปัจจัย

2. การสกัดปัจจัย

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก โดยพิจารณาค่าความสัมพันธ์ร่วมกัน (Communality) คือ ค่าแสดงสัดส่วนของค่าแปรปรวนของตัวแปรที่สามารถอธิบายได้โดย Common Factor โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 ถ้าตัวแปรใดมีค่านี้ต่ำตัวแปรนั้นจะถูกตัดออก สุวิมล และคณะ (2555) พบว่าค่าความสัมพันธ์ร่วมกันของตัวแปรทั้งหมด 34 ตัวแปร อยู่ระหว่าง 0.418 – 0.818

3. การหมุนแกนแบบมุมฉาก (Orthogonal Rotation)

การหมุนแกนวิเคราะห์องค์ประกอบแบบตั้งฉากด้วยวิธีแวริแมกซ์ พบว่าเมื่อพิจารณาค่าน้ำหนัก (Loading) สามารถตัดตัวแปรที่มีค่าน้ำหนักน้อยมากออกไป 1 ตัวแปร ทำให้เหลือตัวแปรทั้งหมด 33 ตัวแปร ซึ่งสามารถจัดเข้ากลุ่มปัจจัยได้ 7 ปัจจัย ที่มีค่าไอเกน (Eigenvalue) เกิน 1.00 และสามารถอธิบายความแปรปรวนที่เกิดขึ้นได้ร้อยละ 68.020 ดังแสดงใน Table 1 และตั้งชื่อปัจจัยให้สอดคล้องกับตัวแปรตามบริบทดังแสดงใน Table 2

4. ความเที่ยงตรงเชิงเหมือน (Convergent Validity)

การทบสอบความเที่ยงตรงเชิงเหมือน สามารถพิจารณาจากค่า Item-to-Total Correlation ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวกับผลรวมของตัวแปรที่เหลือทั้งหมด โดยผลการวิเคราะห์ค่าดังกล่าวของตัวแปรทั้งหมด ควรพิจารณาค่าที่มากกว่า 0.3 สุภมาศ และคณะ (2551) พบว่าค่า Item-to-Total Correlation ของตัวแปรต่างๆ ใน 7 องค์ประกอบมีตัวแปรที่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ 2 ตัวแปรคือ ผลกระทบจากการแทรกแซงทางการเมือง (0.112) และ โครงการได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐ (0.297) ส่วนตัวแปรที่เหลือมีค่าอยู่ในระหว่าง 0.303 – 0.715 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าเกณฑ์ทุกตัวแปร โดยผลการวิเคราะห์เป็นดังแสดงใน Table 2

Table 1 Summary of exploratory factor analysis

Total Variance Explained						
	Initial Eigenvalues			Rotation Sums of Squared Loadings		
Component	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	12.053	35.450	35.450	5.134	15.099	15.099
2	3.099	9.114	44.565	4.073	11.979	27.078
3	2.388	7.024	51.589	3.766	11.075	38.153
4	1.719	5.055	56.644	3.702	10.889	49.042
5	1.422	4.182	60.826	2.421	7.120	56.162
6	1.251	3.681	64.506	2.028	5.966	62.128
7	1.194	3.513	68.020	2.003	5.891	68.020

การวิเคราะห์ดัชนีความสำคัญ

การวิเคราะห์ดัชนีความสำคัญของปัจจัยแต่ละกลุ่ม พบว่าผลกระทบต่อสังคมมีความสำคัญมากที่สุดต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ ส่วนระดับความสำคัญของปัจจัยอื่นๆ แสดงดัง Table 3 และลำดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ในแต่ละปัจจัย เป็นดังแสดงใน Table 2

ปัจจัยที่มีความสำคัญอันดับที่ 1 : ผลกระทบต่อสังคม (F6)

ผลกระทบต่อสังคมคิดเป็น 5.97% ของความแปรปรวนทั้งหมด โดยมีดัชนีความสำคัญ 75.76 ปัจจัยนี้ประกอบด้วย 3 ตัวแปร ซึ่งสามารถเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยตามค่าดัชนีความสำคัญได้แก่ มีส่วนช่วยให้เกิดการพัฒนาชุมชนในบริเวณโครงการ (82.03) มีความปลอดภัยต่อชุมชนในแนวเส้นทางของโครงการ (76.27) และมีส่วนช่วยให้เกิดการจ้างงานต่อชุมชนบริเวณโครงการ (68.98) ตามลำดับ ระบุได้ว่า การเกิดการพัฒนาของชุมชนเป็นอีกตัวแปรที่สามารถบ่งชี้ถึงความสำเร็จของโครงการ เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของโครงการมักคำนึงถึงผลประโยชน์ของประชาชนเป็นสำคัญ รวมทั้งต้องอยู่บนพื้นฐานแห่งความปลอดภัย

เนื่องโครงการขนาดใหญ่นั้น เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักของตัวแปร พบว่า การมีส่วนช่วยให้เกิดการจ้างงานต่อชุมชนบริเวณโครงการ (0.815) มีค่าสูงสุดในปัจจัยนี้

Table 2 Factors affecting success and importance variables

Factor	Factor Interpretation	Variable Included in Factor	Loading	Corrected Item Total Correlation	Importance Index	Rank
F1	Project feasibility analysis	Financial analysis	0.755	0.523	71.53	3
		Economic analysis	0.557	0.595	73.22	2
		Technical analysis	0.488	0.588	77.63	1
F2	Planning and design	Project planning	0.778	0.639	76.61	3
		Project Schedule	0.732	0.539	70.34	6
		Field data collection	0.657	0.658	76.95	1
		Project design	0.639	0.715	76.95	2
		Social planning	0.545	0.579	72.88	5
		Machine planning	0.474	0.520	73.56	4
F3	Policy	Impact of political interference	0.773	0.112	74.58	2
		Impact of public protests	0.750	0.303	73.05	3
		Project is sponsored by the government	0.470	0.297	77.12	1
F4	Control and operational	Maintenance	0.807	0.664	76.78	2
		Service safety	0.718	0.643	79.66	1
		Project quality control	0.620	0.608	75.08	3
		Project cost control	0.566	0.581	72.03	5
		Pricing	0.539	0.549	72.54	4
		Project duration control	0.508	0.627	71.36	7
		Network planning	0.374	0.589	72.03	6
F5	Economic return	Project can generate returns as planned	0.845	0.419	71.86	3
		Number of users meets the target	0.772	0.471	71.86	4
		Cost of operation is in accordance with the plan	0.707	0.526	73.05	2
		When closing the project, the project budget is in line with the plan	0.529	0.549	73.90	1
F6	Society impact	Contribute to employment in project community	0.815	0.437	68.98	3
		Contribute to community development in project area	0.606	0.588	82.03	1
		Safety of the community along the route of project	0.520	0.523	76.27	2
F7	Environmental impact	Project can control air pollution	0.847	0.545	71.86	4
		Project can control water pollution	0.808	0.618	72.71	3
		Project can control soil pollution	0.800	0.663	71.00	6
		Project can control ecological impact	0.782	0.652	73.39	1
		Environment planning	0.690	0.674	73.22	2
		Project can control noise pollution	0.653	0.513	68.81	7
		Energy saving	0.618	0.473	71.53	5

ปัจจัยที่มีความสำคัญอันที่ 2 : นโยบาย (F3)

นโยบายคิดเป็น 11.08% ของความแปรปรวนทั้งหมด โดยมีดัชนีความสำคัญ 74.92 ปัจจัยนี้ประกอบด้วย 3 ตัวแปร ซึ่งสามารถเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยตามค่าดัชนีความสำคัญได้แก่ โครงการได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐ (77.12) ผลกระทบจากการแทรกแซงทางการเมือง (74.58) และผลกระทบจากการประท้วงของประชาชน (73.05) ตามลำดับ ระบุได้ว่า การได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐนั้นเป็นตัวแปรสำคัญในปัจจัยนี้ เนื่องจากโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่นั้นต้องมีเงินลงทุนเป็นจำนวนมากการที่ภาครัฐเข้ามาสนับสนุนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้โครงการสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น พร้อมทั้งหาแนวทางในการรับมือกับการแทรกแซงทางเมืองและการประท้วงของประชาชนที่อาจเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักของตัวแปร พบว่า ผลกระทบจากการแทรกแซงทางการเมือง (0.773) มีค่าสูงสุดในปัจจัยนี้

Table 3 Importance ranking of factors

Rank	Factor	Importance Index
1	Society impact (F6)	75.76
2	Policy (F3)	74.92
3	Planning and design (F2)	74.55
4	Control and operational (F4)	74.21
5	Project feasibility analysis (F1)	74.12
6	Economic return (F5)	72.67
7	Environmental impact (F7)	71.79

ปัจจัยที่มีความสำคัญอันที่ 3 : การวางแผนและออกแบบ (F2)

การวางแผนและออกแบบคิดเป็น 11.98% ของความแปรปรวนทั้งหมด โดยมีดัชนีความสำคัญ 74.55 ปัจจัยนี้ประกอบด้วย 6 ตัวแปร ซึ่งสามารถเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยตามค่าดัชนีความสำคัญได้แก่ การเก็บข้อมูลภาคสนาม (76.95) การออกแบบโครงการ (76.95) การวางแผนโครงการ (76.61) การวางแผนการใช้เครื่องจักร (73.56) การวิเคราะห์ด้านสังคม (72.88) และการทำกำหนดเวลาโครงการ (70.34) ตามลำดับ ระบุได้ว่า การเก็บข้อมูลภาคสนาม เป็นตัวแปรที่สำคัญในปัจจัยนี้ ข้อมูลเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่การมีข้อมูลที่เพียงพอจะช่วยให้สามารถคาดการณ์ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตพร้อมทั้งกำหนดแนวทางในการแก้ไข และช่วยให้การวางแผนและออกแบบโครงการไปจนถึงการใช้งานเครื่องจักรได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งนี้การวางแผนจะต้องมีความสัมพันธ์กำหนดเวลาเพื่อให้การทำงานเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักของตัวแปร พบว่า การวางแผนโครงการ (0.778) มีค่าสูงสุดในปัจจัยนี้

ปัจจัยที่มีความสำคัญอันที่ 4 : การควบคุมและการดำเนินการ (F4)

การควบคุมและการดำเนินการคิดเป็น 10.88% ของความแปรปรวนทั้งหมด โดยมีดัชนีความสำคัญ 74.21 ปัจจัยนี้ประกอบด้วย 7 ตัวแปร ซึ่งสามารถเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยตามค่าดัชนีความสำคัญได้แก่ ความปลอดภัยขณะให้บริการ (79.66) การบำรุงรักษา (76.78) การควบคุมคุณภาพของโครงการ (75.08) การกำหนดอัตราค่าใช้บริการ (72.54) การควบคุมค่าใช้จ่ายของโครงการ (72.03) การวางโครงข่าย (72.03) และการควบคุมระยะเวลาของโครงการ (71.36) ตามลำดับ ระบุได้ว่า ความปลอดภัยขณะให้บริการเป็นตัวแปรที่สำคัญในปัจจัยนี้ ความปลอดภัยนั้นเป็นสิ่งแรกที่ใช้ในการพิจารณาเลือกใช้บริการ ทั้งนี้

ความปลอดภัยของโครงการนั้นเกิดขึ้นตั้งแต่ขั้นของการก่อสร้าง โดยการตรวจสอบและควบคุมภาพของโครงการให้เป็นไปตามที่กำหนดจนถึงขั้นของการดำเนินงานจะต้องมีการบำรุงรักษาอยู่เสมอซึ่งจะต้องสอดคล้องกับงบประมาณ เพื่อให้โครงการมีความปลอดภัยอยู่เสมอ เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักของตัวแปร พบว่า การบำรุงรักษา (0.807) มีค่าสูงสุดในปัจจัยนี้

ปัจจัยที่มีความสำคัญอันที่ 5 : การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ (F1)

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการคิดเป็น 15.09% ของความแปรปรวนทั้งหมด โดยมีดัชนีความสำคัญ 74.12 ปัจจัยนี้ประกอบด้วย 3 ตัวแปร ซึ่งสามารถเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยตามค่าดัชนีความสำคัญได้แก่ การวิเคราะห์ด้านเทคนิคทางวิศวกรรม (77.63) การวิเคราะห์ด้านการเงิน (71.53) และการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ (73.22) ตามลำดับ ระบุได้ว่า การวิเคราะห์ด้านเทคนิคทางวิศวกรรมเป็นตัวแปรสำคัญในปัจจัยนี้ เนื่องจากโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่นั้นมีลักษณะที่ซับซ้อนแตกต่างกันออกไปตามประเภทของโครงการจึงจำเป็นต้องพิจารณาเลือกเทคนิคการก่อสร้างที่มีความเหมาะสม รวมทั้งจะต้องสอดคล้องกับเงินทุนหรืองบประมาณโครงการที่ได้กำหนดไว้ เพื่อให้สามารถใช้งานเครื่องจักรได้เต็มประสิทธิภาพและสอดคล้องกับแผนงานก่อสร้าง เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักของตัวแปร พบว่า การวิเคราะห์ด้านการเงิน (0.755) มีค่าสูงสุดในปัจจัยนี้

ปัจจัยที่มีความสำคัญอันที่ 6 : ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (F5)

ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์คิดเป็น 7.12% ของความแปรปรวนทั้งหมด โดยมีดัชนีความสำคัญ 72.67 ปัจจัยนี้ประกอบด้วย 4 ตัวแปร ซึ่งสามารถเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยตามค่าดัชนีความสำคัญได้แก่ เมื่อปิดโครงการงบประมาณโครงการเป็นไปตามแผนที่กำหนดไว้ (73.90) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเป็นไปตามแผนที่กำหนดไว้ (73.05) โครงการสามารถสร้างผลตอบแทนได้ตามแผนที่กำหนดไว้ (71.86) และจำนวนผู้ใช้บริการเป็นไปตามเป้าที่ตั้งไว้ (71.86) ตามลำดับ ระบุได้ว่า เมื่อปิดโครงการงบประมาณโครงการเป็นไปตามแผนที่กำหนดไว้เป็นตัวแปรสำคัญในปัจจัยนี้ กล่าวได้ว่างบประมาณเป็นกุญแจสำคัญที่ใช้ในการประเมินความสำเร็จของโครงการ เนื่องงบประมาณสามารถแสดงให้เห็นถึงผลการดำเนินงาน ดังนั้นโครงการที่มีค่าใช้จ่ายอยู่ในงบประมาณที่กำหนดแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลและประสิทธิภาพในการดำเนินงาน ทั้งนี้โครงการต้องสามารถสร้างผลตอบแทนและมีจำนวนผู้ใช้บริการตามแผนเพื่อให้โครงการสามารถดำเนินไปได้อย่างเป็นปกติ เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักของตัวแปร พบว่า โครงการสามารถสรร้างผลตอบแทนได้ตามแผนที่กำหนดไว้ (0.845) มีค่าสูงสุดในปัจจัยนี้

ปัจจัยที่มีความสำคัญอันที่ 7 : ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (F7)

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคิดเป็น 5.891% ของความแปรปรวนทั้งหมด โดยมีดัชนีความสำคัญ 71.79 ปัจจัยนี้ประกอบด้วย 7 ตัวแปร ซึ่งสามารถเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปน้อยตามค่าดัชนีความสำคัญได้แก่ โครงการสามารถควบคุมผลเสียที่มีต่อระบบนิเวศ (73.39) การวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อม (73.22) โครงการสามารถควบคุมมลพิษทางน้ำ (72.71) โครงการสามารถควบคุมมลพิษทางอากาศ (71.86) โครงการถูกออกแบบมาให้คำนึงถึงการใช้พลังงาน (71.53) โครงการสามารถควบคุมมลพิษทางดิน (71.00) และโครงการสามารถควบคุมมลพิษทางเสียง (68.81) ตามลำดับ ระบุได้ว่า โครงการสามารถควบคุมผลเสียที่มีต่อระบบนิเวศเป็นตัวแปรที่สำคัญในปัจจัยนี้ เนื่องจากโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่นั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมใน

บริเวณโครงการ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้มีผลกระทบต่อรูปแบบการใช้ชีวิตของสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็น สัตว์ หรือมนุษย์ นอกจากนี้ การก่อสร้างโครงการขนาดใหญ่นั้นยังมีการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากซึ่งทำให้เกิดฝุ่นควันซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรอบข้างเป็นอย่างมาก ไม่ได้มีเพียงแต่ผลพิษทางอากาศเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบทางน้ำ ดิน เสียง และระบบนิเวศ ดั้งนั้นการลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักของตัวแปร พบว่า โครงการสามารถควบคุมมลพิษทางอากาศ (0.847) มีค่าสูงสุดในปัจจัยนี้

สรุป

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้ เพื่อศึกษาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ โดยการกำหนดตัวแปรจากการรวบรวมข้อมูล และศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสำเร็จของโครงการ การกำหนดขอบเขตโครงการ และการพัฒนาโครงการให้เกิดความยั่งยืน โดยใช้แบบสอบถามจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้า และทางด่วน และนำตัวแปรทั้ง 34 ตัวแปร มาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบสามารถจัดกลุ่มได้ 7 ปัจจัย คือ ปัจจัยด้านการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ ปัจจัยด้านการวางแผนและออกแบบ ปัจจัยด้านนโยบาย ปัจจัยด้านการควบคุมและการดำเนินการ ปัจจัยด้านผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ ปัจจัยด้านผลกระทบต่อสังคม และปัจจัยด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การศึกษาภาพรวมความคิดเห็นของปัจจัยต่างๆ โดยนำมาวิเคราะห์ดัชนีความสำคัญ เพื่อเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยทั้ง 7 ปัจจัย สามารถระบุได้ว่า ปัจจัยด้านผลกระทบทางสังคมเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่สุด (ดัชนีความสำคัญ 75.76) ซึ่งผลกระทบทางสังคมเป็นปัจจัยที่แสดงถึงผลกระทบในแง่บวกที่มีต่อชุมชนในบริเวณโครงการและใช้ในการประเมินความสำเร็จของโครงการ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Liyin Shen *et al.* (2010) ที่พบว่าปัจจัยด้านประสิทธิภาพทางสังคม และ Albert *et al.* (2004) ที่พบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์เป็นปัจจัยที่สามารถชี้วัดความสำเร็จของโครงการได้

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา 7 ปัจจัยหลักข้างต้น และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ พบว่าปัจจัยด้านผลกระทบต่อสังคมส่งผลต่อความสำเร็จมากที่สุด โดยมีตัวแปรการมีส่วนช่วยให้เกิดการพัฒนาชุมชนในบริเวณโครงการเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในปัจจัย จากงานวิจัยนี้สามารถช่วยให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องสามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาโครงการที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ หรือ โครงการอื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึง เพื่อให้โครงการประสบความสำเร็จสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

อภิญญา จันทรัตน์, สุธาริน สถาปิตานนท์ และ วิโรจน์ รุโจปการ. 2017. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสำเร็จในการก่อสร้างอาคารสูง, น. 609-614. *ใน* **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22**, นครราชสีมา.

สุภมาศ อังสุโชติ, สมถวิล วิจิตรวรรณา และรัชนีกูล ภิญโญภานุวัฒน์. 2551. **สถิติวิเคราะห์สำหรับการวิจัยทางสังคมศาสตร์และพฤติกรรมศาสตร์ เทคนิคการใช้โปรแกรม** LISREL. เจริญดีมั่นคงการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

สุวิมล ติรกานันท์. 2555. **การวิเคราะห์ตัวแปรพหุในงานวิจัยทางสังคมศาตร์**. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Albert, P. C., S. David and P. L. Ada. 2004. Factors affecting the success of construction project. **Journal of Construction Engineering and Management** 130 (1): 153-155.

Hany, S. T., H. M. Deen and M. E. Razek. 2012. Assessment of the expected cost of quality (COQ) in construction projects in Egypt using artificial neural network model. **Housing and Building National Research Center** Journal 8: 132-143.

Li-yin, S., W.Y. Vivian, T. Leona and J. Ying-bo. 2010. Project feasibility study: the key to successful implementation of sustainable and socially responsible construction management practice. **Journal of Cleaner Production** 18: 254-259.

Roger, A., B. Richard, G. Stephen and T. Tony. 2008. **Success and Failure in Urban Transport Infrastructure Projects.** KPMG International, London.

Syed, Z. S. T. and N. E. Kumar. 2012. Success traits for a construction project. **Journal of Construction Engineering and Management** 138 (10): 1131-1138.

การผลิตอนุภาคโคคริสตอลระหว่างยาเมเฟนามิคแอซิดกับยาพาราเซตามอลด้วยกระบวนการ Gas Anti-Solvent (GAS)

Production of Mefenamic Acid–Paracetamol Cocrystals using Gas Anti-Solvent (GAS) Process

นภาดา วิเชียรพงษ์[1] และ มานพ เจริญไชยตระกูล[1*]

Napada Wichianphong[1] and Manop Charoenchaitrakool[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตอนุภาคโคคริสตอลระหว่างตัวยาเมเฟนามิคแอซิด (MEF) กับตัวยาพาราเซตามอล (PAR) ด้วยกระบวนการ Gas Anti-Solvent (GAS) cocrystallization เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการละลายของตัวยา MEF โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตเป็นตัวต้านการละลายและอะซิโตนเป็นตัวทำละลาย โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างตัวยา PAR ต่อ MEF (1:1–5:1) และอุณหภูมิ (25–45 °C) ที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการละลายของตัวยา MEF ที่ 63.2% ($t_{63.2}$) จากการศึกษาพบว่า อนุภาคโคคริสตอลที่ผลิตในช่วงอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 3:1–5:1 และอุณหภูมิ 25–45 °C สามารถปรับปรุงอัตราการละลายของตัวยา MEF ได้ โดยมี %drug content อยู่ระหว่าง 19–26% และพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 4:1 และที่อุณหภูมิ 35 °C จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการละลายเร็วที่สุด โดยมีค่า $t_{63.2}$ เท่ากับ 12.77 นาที ซึ่งเร็วกว่าของผสมทางกายภาพและตัวยา MEF บริสุทธิ์ 2.4 และ 5.3 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า อนุภาคโคคริสตอลที่ผลิตจากกระบวนการ GAS มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าของผสมทางกายภาพ

ABSTRACT

In this study, Gas Anti-Solvent (GAS) technique was used to produce the cocrystals of mefenamic acid–paracetamol (MEF–PAR) in order to enhance dissolution rate of mefenamic acid. The GAS process was carried out using acetone as a solvent and carbon dioxide as an anti-solvent. The effects of PAR-to-MEF molar ratio (1:1–5:1) and temperature (25–45 °C) on time required to dissolve 63.2% of the drug ($t_{63.2}$) were investigated. It was found that the GAS product with improved dissolution rate of MEF could be produced from PAR-to-MEF molar ratio in the range of 3:1–5:1, temperature in the range of 25–45 °C, and %drug contents in the range of 19–26% were obtained. The cocrystals produced from PAR-to-MEF molar ratio of 4:1 at temperature of 35 °C had the highest dissolution rate ($t_{63.2}$ = 12.77 min.), and showed an enhanced dissolution rate 2.4 times greater than that of physical mixture and 5.3 times greater than pure MEF. In addition, the size of the cocrystal particles produced by GAS was smaller compared to physical mixture.

Key Words: cocrystal, mefenamic acid, paracetamol, Gas Anti-Solvent

*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

ในปัจจุบัน มากกว่า 40-60% ของตัวยาที่จำหน่ายในท้องตลาด เป็นยาที่ละลายน้ำได้น้อย (Shewale, 2015) ความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยจะส่งผลให้ยามีชีวปริมาณออกฤทธิ์ต่ำ (Low bioavailability) (Kaur *et al*., 2012) และมีประสิทธิภาพต่ำในการรักษา ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติของยาให้มีการละลายที่ดีขึ้นจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยา แนวทางในการเพิ่มการละลายของยามีหลายวิธี เช่น การตกผลึกในระดับนาโน (Nanocrystallization) การเตรียมยาในรูปแบบเกลือ (Salt formation) ระบบกระจายตัวยาในตัวพาของแข็ง (Solid dispersion) การทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation) การเตรียมยาในรูปแบบยาแขวนตะกอนระดับนาโนเมตร (Nano- suspension) และระบบนำส่งยาในรูปแบบเซลฟ์อิมัลซิฟายด์ (Self-emulsifying drug delivery systems) เป็นต้น (Kanaujia *et al*., 2015; Hart *et al*., 2013)

การนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต (Dense CO_2) มาใช้ประโยชน์เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่นำมาช่วยปรับปรุงการละลายของยาได้ เช่น การผลิตยาให้อยู่ในรูปของโคคริสตอลที่สามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น นอกจากนี้กระบวนการการใช้ CO_2 ยังมีข้อดีหลายประการ เช่น มีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนและใช้เวลาสั้น สามารถปรับลักษณะและขนาดของอนุภาคของผลิตภัณฑ์ได้โดยการปรับสภาวะในกระบวนการผลิต ช่วยลดการใช้ความร้อนและแรงกระทำต่อสารออกฤทธิ์ในยา (API) เมื่อเทียบกับกระบวนการบด (Grinding process) และยังช่วยลดการใช้ตัวทำละลายและลดการปนเปื้อนของตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์เมื่อเทียบกับกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายเป็นหลัก (Ober *et al*., 2013; Erriguible *et al*., 2015)

ในงานวิจัยนี้ ได้นำกระบวนการ Gas Anti-Solvent (GAS) มาใช้ในการผลิตโคคริสตอลระหว่างตัวยาเมเฟนามิคแอซิด (Mefenamic acid, MEF) และตัวยาพาราเซตามอล (Paracetamol, PAR) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการละลายของยาเมเฟนามิคแอซิด โดยทำการหาปริมาณอัตราส่วนโดยโมลของตัวยา PAR ต่อตัวยา MEF (PAR-to-MEF molar ratio) และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระบวนผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการละลายของตัวยา MEF ที่สูงขึ้น ยา MEF เป็นยาที่ใช้บรรเทาอาการปวด เช่น ปวดหัว ปวดฟัน ปวดประจำเดือน และอาการปวดที่เกิดจากโรคข้อเสื่อม และถูกจัดอยู่ใน Class II ตามมาตรฐาน Biopharmaceutics Classification System (BCS) ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำที่น้อย แต่สามารถดูดซึมได้ดี ยา PAR ซึ่งเป็นยาที่นิยมใช้ในการบรรเทาอาการปวดและลดไข้ ถูกเลือกใช้เป็นสารโคฟอร์มเมอร์ (Coformer) ในการเกิดโคคริสตอลกับตัวยา MEF เนื่องจากโมเลกุลของตัวยา PAR ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่เอไมด์ และ หมู่ไฮดรอกซิล ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนที่จะทำให้เกิดเป็นโคคริสตอลได้ (Hiendrawan *et al*., 2016) นอกจากนี้ผลวิจัยทางคลินิกของ Seshagiri Rao and Sailaja (2015) รายงานว่า ตัวยาผสมระหว่างตัวยา MEF และตัวยา PAR มีประสิทธิภาพในการลดไข้ที่ดีกว่าตัวยา PAR เพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งในปัจจุบันตัวยาผสมระหว่าง MEF และ PAR ได้ถูกจัดจำหน่ายตามท้องตลาดในสัดส่วนยา MEF:PAR ที่หลากหลาย เช่น 50 mg: 125 mg (ACTIZA), 500 mg: 325 mg (MEFTAL-FORTE) และ 500 mg: 500 mg (DYSMEN FORTE) เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนายาให้อยู่ในรูปแบบอนุภาคโคคริสตอล MEF–PAR นอกจากจะได้ประโยชน์ในแง่ของการเพิ่มอัตราการละลายของตัวยา MEF แล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังเป็นส่วนผสมของตัวยา MEF กับ PAR ซึ่งสามารถออกฤทธิ์ได้ดีในการลดไข้อีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

ตัวยาเมเฟนามิคแอซิด ($C_{15}H_{15}NO_2$, ความบริสุทธิ์ 98%, บริษัท Sigma,) ตัวยาพาราเซตามอล ($C_8H_9NO_2$, ความบริสุทธิ์ 98%, บริษัท Tokyo Chemical Industry) อะซิโตน (ความบริสุทธิ์ 99.5%, บริษัท Quality Reagent Chemical) คาร์บอนไดออกไซด์ (High purity grade, บริษัท TIG) น้ำ DI (De-ionization)

การตกตะกอนด้วยเทคนิค GAS

ละลายตัวยาเมเฟนามิคแอซิด (MEF) และตัวยาพาราเซตามอล (PAR) ในอัตราส่วนโดยโมลของ PAR ต่อ MEF ที่ต้องการ (1:1, 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1) ด้วยอะซิโตน 5 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้ 80% MEF saturation จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่อง Ultrasonicator เพื่อให้เกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ แล้วนำสารละลายที่ได้มาบรรจุลงในห้องตกตะกอน (Precipitation chamber) ที่อยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ดังแสดงใน Figure 1 จากนั้นเติม CO_2 เข้าสู่ปั๊มความดันสูงทางวาล์ว V-1 เมื่อได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ จะเริ่มกระบวนการโดยการป้อน CO_2 ที่อัตราการไหลคงที่ที่ 10 มิลลิลิตรต่อนาทีเข้าสู่ระบบโดยการเปิดวาล์ว V-2, V-3 และ V-4 เพื่อให้ CO_2 ไหลเข้าสู่ด้านล่างของห้องตกตะกอน ความดันเริ่มต้นที่ใช้เปิดเข้าสู่ระบบคือ 63 บาร์ และเพิ่มความดันของระบบขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งการเพิ่มความดันจะทำให้สารละลายเกิดการขยายตัว ทำให้ความแข็งแรงของตัวทำละลายอินทรีย์ลดลง มีผลทำให้ความสามารถในการทำละลายของตัวทำละลายลดลง ตัวถูกละลายจึงตกตะกอนออกมา เมื่อเพิ่มความดันของระบบจนถึง 90 บาร์ ทำการล้างตัวทำละลายออกจากห้องตกตะกอนด้วยความดันคงที่ที่ 90 บาร์ โดยการเปลี่ยนทิศทางของวาล์ว V-3 และ V-4 เพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของ dense CO_2 ให้ไหลเข้าทางด้านบนของห้องตกตะกอน โดยจะทำให้ตัวทำละลายถูกผลักออกทางวาล์ว V-4 และ V-5 ตามลำดับ โดยขั้นตอนการล้างตัวทำละลายนี้จะใช้ CO_2 ปริมาตร 80 มิลลิลิตร จากนั้นทำการลดความดันให้เข้าสู่บรรยากาศและเก็บผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในห้องตกตะกอนไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตัวยา MEF (%MEF content) วิเคราะห์อัตราการละลายด้วย Dissolution test วิเคราะห์การเกิดโคคริสตอลด้วย DSC และ FT-IR วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย SEM

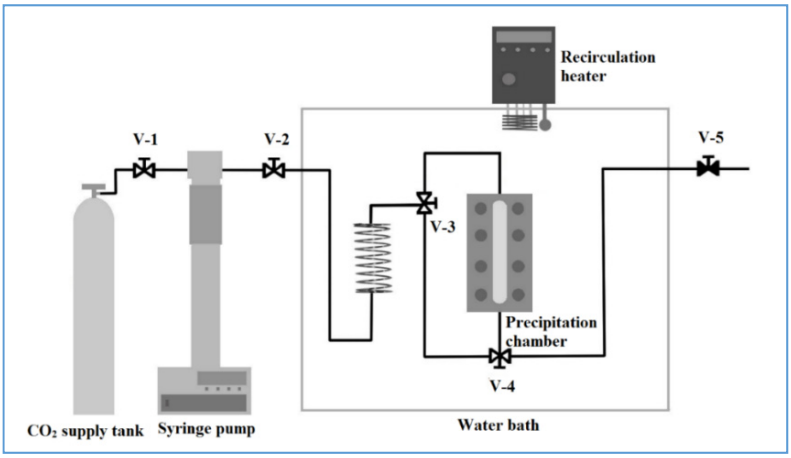


Figure 1 Schematic diagram of Gas Anti-Solvent cocrystallization apparatus.

การเตรียมของผสมทางกายภาพ

ชั่งยา MEF และ PAR ตามสัดส่วนต่าง ๆเพื่อให้ได้ %MEF content ตามที่ต้องการ ทำการผสมให้เข้ากันโดยคลุกด้วยช้อนตักสารเป็นเวลา 1 นาทีแล้วนำของผสมไปทำการวิเคราะห์ทันที ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเกาะรวมตัวกันของยาทั้งสองชนิดอันเนื่องมาจากความชื้นในอากาศ

การวิเคราะห์หาปริมาณตัวยา MEF ในผลิตภัณฑ์ (%Drug content)

ชั่งสารตัวอย่าง 3 มิลลิกรัม จากนั้นละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.6 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 335 นาโนเมตร และคำนวณ Drug content ตามสมการ

$$\%\text{drug content} = \frac{\text{mass of the drug in particles}}{\text{total mass of particles}} \times 100$$

การวิเคราะห์อัตราการละลายของยาด้วยวิธี Dissolution test

กวนสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.6 ปริมาตร 900 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง Magnetic stirrer ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที (rpm) ที่อุณหภูมิ 37 °C ซึ่งเป็นการจำลองอุณหภูมิภายในร่างกาย จากนั้นชั่งสารตัวอย่างที่มีปริมาณเทียบเท่ากับตัวยา MEF 5 มิลลิกรัม (สำหรับผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ GAS คำนวณได้จาก %MEF content ที่หาได้) จากนั้นเทสารตัวอย่างลงในสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมไว้และเก็บสารละลายครั้งละ 4 มิลลิลิตรที่เวลาต่างๆ นำสารละลายที่เก็บได้มากรองด้วย Syringe filter ขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตัวยา MEF ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 335 นาโนเมตร ตัวแปรที่ใช้ในเปรียบเทียบอัตราการละลายคือ เวลาที่ใช้ในการละลายปริมาณยา MEF ได้เท่ากับ 63.2% ของปริมาณยา MEF ทั้งหมดที่ใส่ไป ($t_{63.2}$)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนร่วมระหว่างยา MEF กับยา PAR

ผลของอัตราส่วนโดยโมลของตัวยา PAR ต่อ MEF (PAR-to-MEF molar ratios) ต่อเวลาในการละลายของตัวยา MEF ที่ 63.2% ($t_{63.2}$) ดังแสดงใน Table 1 (การทดลองที่ 1–5) พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:1 และ 2:1 ผลิตภัณฑ์มีอัตราการละลายที่ใกล้เคียงกับของผสมทางกายภาพที่มี %MEF content เท่ากัน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจาก สารละลายเริ่มต้นมีความเข้มข้นของ PAR ต่ำ ทำให้ตัวยา PAR ตกตะกอนออกมาได้น้อย เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณอนุภาคโคคริสตอลที่น้อย หรือตัวยา PAR และ MEF อาจเกิดการตกตะกอนแยกกันไม่เกิดเป็นอนุภาคโคคริสตอล ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีอัตราการละลายที่ต่ำ สำหรับที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 3:1, 4:1 และ 5:1 พบว่ามีอัตราการละลายสูงกว่าของผสมทางกายภาพ โดยที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 4:1 จะให้อัตราการละลายเร็วที่สุด ซึ่งเท่ากับ 12.77 นาที คิดเป็น 2.4 เท่าเมื่อเทียบกับการละลายของของผสมทางกายภาพที่มี %MEF content เท่ากัน อัตราการละลายที่สูงขึ้นนี้อาจเป็นผลจากการมีปริมาณตัวยา PAR ในสารละลายเริ่มต้นมากขึ้น ทำให้ตัวยา PAR ตกตะกอนมากขึ้นเมื่อสัมผัสกับ dense CO_2 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวต้านการละลาย และเกิดอนุภาคโคคริสตอลมากขึ้นในผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้อัตราการละลายสูงขึ้น อย่างไรก็ตามหากมีปริมาณยา PAR ในสารละลายเริ่มต้นมากเกินไป เช่น ที่อัตราส่วนเท่ากับ 5:1 ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนที่เร็วขึ้นและอาจมีผลให้ปริมาณโคคริสตอลที่เกิดขึ้นมีน้อยลง จึงทำให้มีอัตราการละลายที่ต่ำลงเล็กน้อย

ผลของอุณหภูมิในการผลิตอนุภาคต่อเวลาในการละลายของตัวยา MEF ที่ 63.2% ($t_{63.2}$) แสดงใน Table 1 (การทดลองที่ 4, 6, 7) พบว่าที่อุณหภูมิ 35 °C (การทดลองที่ 4) เป็นสภาวะที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการละลายเร็วที่สุด ซึ่ง $t_{63.2}$ เท่ากับ 12.77 นาที และพบว่าที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 35 °C (ที่ 45 °C ในการทดลองที่ 7) มีอัตราการละลายที่ต่ำลง ทั้งนี้อาจเป็นผลจากที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มที่จะทำให้อนุภาคของผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่

ขึ้น ตามรายงานวิจัยของ Fusaro and Mozzotti (2004) ที่ทำการตกผลึกตัวยา PAR ในอะซิโตนด้วยเทคนิค GAS ในช่วง 5–40 °C ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้อนุภาคผลึกของยา PAR มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นส่งผลต่อพื้นที่ผิวที่น้อยลงและอาจส่งผลต่อการละลายที่ต่ำลง นอกจากนี้ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 35 °C (ที่ 25 °C ในการทดลองที่ 6) พบว่ามีอัตราการละลายที่ต่ำลงเช่นกัน เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้ความสามารถในการละลายของยาในอะซิโตนลดลง เป็นผลให้ตัวยาเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็วและอาจเกิดโคคริสตอลได้น้อยลง นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิต่ำยังส่งผลให้ %PAR เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้อยลง (%MEF content เพิ่มขึ้นจาก 22 % เป็น 26% ดังการทดลองที่ 4 และ 6) การเกิดโคคริสตอลอาจมีปริมาณน้อยลง อาจส่งผลให้อัตราการละลายลดลง

ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ GAS ที่เตรียมจากอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 4:1 ที่ 35 °C (การทดลองที่ 4 ใน Table 1) ให้ผลอัตราการละลายสูงที่สุด ดังนั้น ผลิตภัณฑ์นี้จึงถูกเลือกเป็นตัวอย่างที่จะนำไปวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป รวมทั้งทำการเปรียบเทียบกับของผสมทางกายภาพที่มี %MEF content เท่ากัน และตัวยา MEF บริสุทธิ์

Table 1 Time required to achieve 63.2% ($t_{63.2}$) of MEF dissolution for different PAR-to-MEF ratios and temperatures in the GAS process.

No.	PAR-to-MEF molar ratio	Temp. (°C)	%MEF content in starting solution	%MEF content in GAS product	$t_{63.2}$ (min)	
					Product by GAS	Physical mixture*
1	1:1	35	61%	65%	42.80	40.95
2	2:1	35	44%	35%	29.13	34.33
3	3:1	35	35%	26%	17.52	31.35
4	4:1	35	29%	22%	12.77	31.11
5	5:1	35	24%	19%	13.19	21.32
6	4:1	25	29%	26%	17.09	31.35
7	4:1	45	29%	23%	18.45	31.27

Remarks: (1) $t_{63.2}$ of unprocessed MEF = 68.75 min. (2) Physical mixture* containing the same %MEF content as the GAS product.

ผลการวิเคราะห์อนุภาคโคคริสตอลด้วยเทคนิค DSC และ FT-IR

ผลิตภัณฑ์ถูกวิเคราะห์การเกิดโคคริสตอลด้วยเทคนิค DSC ดังแสดงใน Figure 2 พบว่า ตัวยา MEF และตัวยา PAR มีจุดหลอมเหลวที่ 229.5 °C และ 168.9 °C ตามลำดับ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ GAS มีจุดหลอมเหลวใหม่เกิดขึ้นที่ 165.9 °C และ 167.1 °C ซึ่งแตกต่างจากตัวยาสารตั้งต้นทั้งคู่ และมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของตัวยา PAR เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าจุดหลอมเหลวของโคคริสตอล MEF–PAR ที่ถูกผลิตขึ้นด้วยวิธี solvent evaporation method (T_m = 160–165 °C) ในงานวิจัยของ Pathak *et al*. (2013) จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ GAS นี้มีโคคริสตอลเกิดขึ้น ในขณะที่ของผสมทางกายภาพที่ มีจุดหลอมเหลวที่ 168.8 °C และ 170.7 °C ซึ่งไม่ปรากฏจุดหลอมเหลวของโคคริสตอล

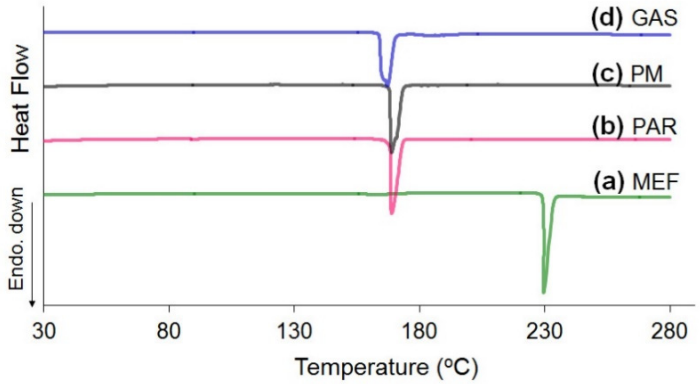


Figure 2 DSC heating curves of (a) MEF, (b) PAR, (c) physical mixture and (d) cocrystals by GAS.

นอกจากนี้ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ GAS ไปทำการวิเคราะห์ด้วย FT-IR พบว่า พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น (Wave number) เท่ากับ 3311 cm^{-1} (N-H stretching) และ 1576 cm^{-1} (N-H bending) ของยา MEF และพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ 1657 cm^{-1} (C=O stretching) ของยา PAR หายไป จึงเป็นการยืนยันได้ว่าผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ GAS เป็นอนุภาคโคคริสตอล (Gujar *et al*., 2012; Schultheiss and Newman, 2009)

ผลการวิเคราะห์อัตราการละลาย

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าโคคริสตอลที่ผลิตได้สามารถช่วยเพิ่มอัตราการละลายให้กับ MEF ได้ อนุภาคโคคริสตอลจึงถูกนำมาหาค่าการละลายที่เวลาต่างๆ ดังแสดงใน Figure 3 พบว่า $t_{63.2}$ ของโคคริสตอล มีค่าเท่ากับ 12.77 นาที ซึ่งสามารถละลายได้เร็วกว่าของผสมทางกายภาพที่ %MEF content เท่ากันและตัวยา MEF บริสุทธิ์เท่ากับ 2.4 และ 5.3 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า โคคริสตอลสามารถละลายจนหมดภายใน 60 นาที ในขณะที่ของผสมทางกายภาพและตัวยา MEF ใช้เวลาในการละลายจนหมดมากกว่า 360 นาที จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า โคคริสตอลจากกระบวนการ GAS สามารถเพิ่มอัตราการละลายของตัวยา MEF ได้

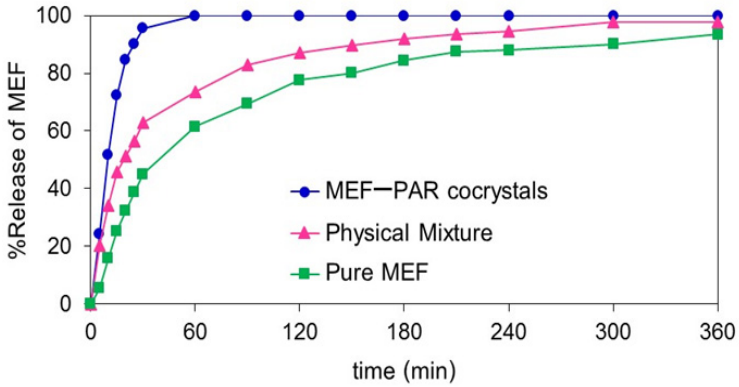


Figure 3 Dissolution profiles of MEF–PAR cocrystals using PAR-to-MEF molar ratio of 4:1 at 35 °C compared to physical mixture and pure MEF.

ผลการวิเคราะห์อนุภาคด้วยเทคนิค SEM

ขนาดและลักษณะของอนุภาคโคคริสตอลเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติของโคคริสตอล (Padrela *et al*., 2014) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดัง Figure 4 พบว่าโคคริสตอล MEF–PAR จากกระบวนการ GAS (Figure 4d) มีลักษณะอนุภาคที่แตกต่างจากอนุภาคของสารตั้งต้น คือ ยา MEF (Figure

4a) และ ยา PAR (Figure 4b) และมีขนาดที่เล็กละเอียดกว่าของผสมทางกายภาพ (Figure 4c) อนุภาคโคคริสตอลมีลักษณะเป็นก้อนเล็กทรงเหลี่ยมโดยมีแท่งบางขนาดเล็กเกาะและกระจายอยู่ทั่วไป อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้ย่อมส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้นต่อสารละลายบัฟเฟอร์ อาจเป็นอีกปัจจัยที่มีส่วนช่วยเพิ่มอัตราการละลายให้กับอนุภาคโคคริสตอล ดังแสดงในหัวข้อผลของอัตราการละลาย

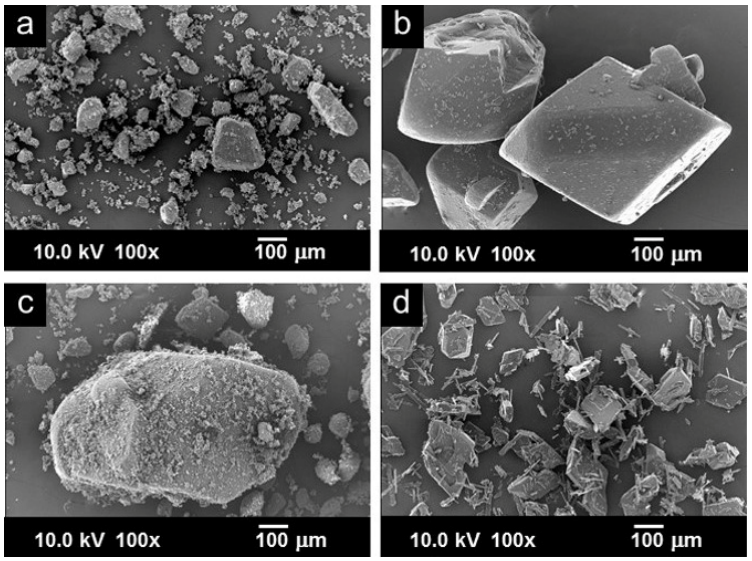


Figure 4 SEM images at x100 magnification of (a) MEF, (b) PAR, (c) physical mixture and (d) MEF–PAR cocrystals by GAS.

สรุป

กระบวนการ GAS สามารถนำมาใช้ผลิตอนุภาคโคคริสตอลระหว่างตัวยา MEF กับตัวยา PAR ได้ โดยในช่วงอัตราส่วนโดยโมลของตัวยา PAR ต่อ MEF ระหว่าง 3:1–5:1 ที่อุณหภูมิ 35–45 °C จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการละลายของยา MEF สูงกว่าของผสมทางกายภาพและยา MEF บริสุทธิ์ โดยที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 4:1 ที่อุณหภูมิ 35 °C จะให้ผลการละลายดีที่สุด นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM แสดงให้เห็นว่า อนุภาคโคคริสตอลจากกระบวนการ GAS มีอนุภาคที่เล็กกว่าของผสมทางกายภาพ อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่น่าสนใจต่อไป คือการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ เช่น เปอร์เซ็นต์ความอิ่มตัวของ MEF ในสารละลายเริ่มต้น รวมทั้งการนำสถิติมาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมร่วมกันของตัวแปรต่างๆ เพื่อให้ได้อัตราการละลายสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์วิทยาการขั้นสูงด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรมเคมี อาหารและการเกษตร ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Erriguible, A., C. Neurohr, A.-L. Revelli, S. Laugier, G. Fevotte and P. Subra-Paternault. 2015. Cocrystallization induced by compressed CO_2 as antisolvent: simulation of a batch process for the estimation of nucleation and growth parameters. **The Journal of Supercritical Fluids** 98: 194-203.

Fusaro, F., M. Mazzotti. 2004. Gas antisolvent recrystallization of paracetamol from acetone using compressed carbon dioxide as antisolvent. **Crystal Growth & Design** 4 (5): 881-889.

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.

Hart, M.L., D.P. Do, R.A. Ansari and S.A A Rizvi. 2013. Brief overview of various approaches to enhance drug solubility. **Journal of Developing Drugs** 2 (3): 1-7.

Hiendrawan, S., B. Veriansyah, E. Widjojokusumo, S.N. Soewandhi, S. Wikarsa, R.R. Tjandrawinata. 2016. Simultaneous cocrystallization and micronization of paracetamol—dipicolinic acid cocrystal by supercritical antisolvent (SAS). **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences** 8 (2): 89-98.

Kanaujia, P., P. Poovizhi, W.K. Ng, R.B.H. Tan. 2015. Amorphous formulations for dissolution and bioavailability enhancement of poorly soluble APIs. **Powder Technology** 285: 2-15.

Kaur, J., G. Aggarwal, G. Singh and A.C. Rana. 2012. Improvement of drug solubility using solid dispersion. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences** 4 (2): 47-53.

Ober, C. A., S.E. Montgomery and R.B. Gupta. 2013. Formation of itraconazole/L-malic acid cocrystals by gas antisolvent cocrystallization. **Powder Technology** 236: 122-131.

Padrela, L., M.A. Rodrigues, J. Tiago, S.P. Velaga, H.A. Matos and E.G. de Azevedo. 2014. Turning physicochemical properties of theophylline by cocrystallization using the supercritical fluid enhanced atomization technique. **The Journal of Supercritical Fluids** 86: 129-136.

Pathak, C. D., K. T. Savjani, A. K. Gajjar and J. K. Savjani. 2013. Cocrystal formation of paracetamol with indomethacin and mefenamica acid: an efficient approach to enhance solubility. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences** 5 (4): 414-419.

Schultheiss, N. and A. Newman. 2009. Pharmaceutical cocrystals and their physicochemical properties. **Crystal Growth & Design** 9 (6): 2950-2967.

Seshagiri Rao, M. and G. Sailaja. 2015. Evaluation of efficacy and tolerability of acetaminophen (paracetamol) and mefenamic acid and paracetamol combination as antipyretic in pediatric patients with febrile illness: a comparative study. **Journal of Dental and Medical Sciences** 14 (2): 5-9.

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.

การศึกษาทัศนคติและพฤติกรรมการจัดการขยะก่อสร้างของผู้รับเหมาในประเทศไทย

A Study on the Contractor's Attitude and Behavior of Construction Waste Management in Thailand

ตรีทิพย์ ประทุมมณี[1*] และ ปิยนุช เวทย์วิวรณ์[1]

Treethip Pratoommanee[1*] and Piyanut Wethyavivorn[1]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทัศนคติและพฤติกรรมการจัดการขยะก่อสร้างของผู้รับเหมาในประเทศไทย โดยการสัมภาษณ์กลุ่มผู้รับเหมาประเด็น สาเหตุที่ทำให้เกิดขยะก่อสร้าง แนวทางการดำเนินการเพื่อลดปริมาณการเกิดขยะก่อสร้าง และประโยชน์ที่ได้จากการจัดการขยะก่อสร้าง โดยแบ่งกลุ่มตัวแปรเป็น 8 กลุ่มย่อย ได้แก่ กลุ่มประสบการณ์การทำงาน ต่ำกว่า 5 ปี, 6-15 ปี และมากกว่า 15 ปี กลุ่มหน้าที่การงานในตำแหน่งผู้จัดการโครงการ ผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่โครงการ และผู้ปฏิบัติงานส่วนสำนักงาน และกลุ่มประสบการณ์การทำงานอาคารเขียว

ผลการวิจัยพบว่า ทัศนคติและพฤติกรรมของผู้รับเหมาในประเทศไทยแต่ละกลุ่มมีความเห็นพ้องไปในแนวทางเดียวกัน โดยสาเหตุของการเกิดขยะก่อสร้างที่พบเจอบ่อยคือสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงแบบ และความผิดพลาดในช่วงการออกแบบ แนวทางการดำเนินการที่กลุ่มผู้รับเหมาเห็นว่าช่วยลดปริมาณการเกิดขยะก่อสร้างได้ดีที่สุดคือช่วงการวางแผน การให้ความรู้และตระหนักถึงผลกระทบอันเกิดจากขยะก่อสร้าง ในขณะที่ประโยชน์ที่ได้จากการจัดการขยะก่อสร้างมีความเห็นต่าง โดยกลุ่มผู้รับเหมาส่วนใหญ่เห็นว่าการจัดการขยะก่อสร้างช่วยส่งเสริมภาพลักษณ์ที่ดีให้กับองค์กร แต่กลุ่มผู้ที่มีประสบการณ์มากกว่า 15 ปี และกลุ่มตำแหน่งผู้จัดการโครงการ เห็นว่าการจัดการขยะก่อสร้างเป็นผลดีในประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมมากที่สุด

ABSTRACT

The purpose of this study is to examine contractors' attitude and behavior of construction waste management (CWM) in Thailand. We use questionnaires to survey a group of contractors and analyse causes of construction waste, reducing measures of construction waste, and benefits of CWM. The samplers consist of a group of contractors with following qualifications; (1) less than 5-year work experience, (2) 6 to 15 - year work experience, (3) more than 15- year work experience, (4) work position as managers, (5) site technical, (6) office technical, (7) experienced in green buildings, and (8) inexperienced in green buildings.

This study finds that contractors' attitude and behavior of each group corresponding in the same way and the study shows the most frequent causes of construction waste are changes in design and mistakes during design process. The best reducing measures of construction waste that the samplers agree are in planning process and acknowledgement and awareness of construction waste effects. The samplers' perspective towards the benefits of CWM is different, that is most of the contractors reckon that the CWM enhances good image of companies, on the other hand, the samplers who have more than 15- year work experience and work position as managers consider it has the most advantage for environment.

Key Words: Construction waste, waste management, contractor, Thailand

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ในประเทศไทยปัญหาขยะหรือเศษวัสดุที่เหลือทิ้งจากการก่อสร้าง เป็นปัญหาที่เกิดกับชุมชนเมืองที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการก่อสร้างอาคารต่างๆเพิ่มขึ้น ทั้งเพื่อใช้เป็นที่อยู่อาศัย สถานประกอบการ รวมทั้งโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) อันเป็นผลมาจากการเร่งการลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานของภาครัฐ รวมทั้งทิศทางของกิจกรรมการก่อสร้างของภาคเอกชนที่จะปรับตัวสูงขึ้น (นิรัติศัย, 2559)

กรุงเทพมหานครพบปัญหาในการกำจัดเศษวัสดุก่อสร้างมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551 เนื่องจากมีการลักลอบทิ้งเศษวัสดุก่อสร้าง ประมาณการเฉลี่ยได้วันละ 300 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.5 ของปริมาณขยะทั้งหมด (มติชน, 2551) และจากรายงานการศึกษาและสำรวจเพื่อการจัดตั้งศูนย์กำจัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ของเศษมูลฝอยวัสดุก่อสร้างและรื้อถอนสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2554 ได้ระบุปริมาณเฉลี่ยของของเสียจากเศษวัสดุก่อสร้างที่เหลือใช้เป็นจำนวน 5.81 ตัน ในอัตราส่วนต่อพื้นที่ขออนุญาตก่อสร้าง 100 ตารางเมตร (สำนักสิ่งแวดล้อม, 2557)

จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยเรื่องปริมาณเศษวัสดุที่เกิดจากการก่อสร้างพบว่ามีความหลากหลาย ในเชิงของอัตราส่วนปริมาณและประเภทเศษวัสดุก่อสร้างที่เกิดขึ้นตามลักษณะและขนาดของอาคารตัวอย่างเช่น ผลการศึกษาปริมาณเศษวัสดุก่อสร้างในงานก่อสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ในประเทศมาเลเซีย พบปริมาณเศษคอนกรีตมากที่สุด เป็นอัตราส่วน 65.80% และพบปริมาณเศษพลาสติกและบรรจุภัณฑ์น้อยที่สุด เป็นอัตราส่วน 0.05% (Rawshan Ara Begum et al., 2006) ในขณะที่การศึกษาการจัดการขยะจากการก่อสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน พบสัดส่วนของขยะที่เกิดจากวัสดุก่อสร้างในโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่พิเศษ ในกรุงเทพมหานคร พบว่าเป็นบรรจุภัณฑ์ของวัสดุต่างๆมากที่สุด ในอัตราส่วน 58.16% และเศษแผ่นพื้นสำเร็จพบน้อยที่สุดเป็นอัตราส่วน 1.36% (โชคดีและคณะ, 2554)

การบริหารจัดการและการลดปริมาณขยะก่อสร้างจึงเป็นแนวทางที่จะช่วยลดปัญหาการลักลอบทิ้งเศษวัสดุก่อสร้าง ลดปริมาณการเพิ่มของขยะที่ต้องกลับคืนสู่ระบบนิเวศน์ และลดผลกระทบที่เกิดจากการทิ้งขยะกลับสู่แหล่งธรรมชาติ โดยหน่วยงานปกป้องสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดแนวทางการลดปริมาณของเสีย 2 ขั้นตอนคือ การลดของเสียที่แหล่งกำเนิด และการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ดีการดำเนินการก่อสร้างในแต่ละกระบวนการ ล้วนทำให้เกิดเศษวัสดุก่อสร้าง (สุชาและภูษิต, 2555 อ้างถึงใน Karim & Marosszeky, 1999) ซึ่งผู้ที่ทำหน้าที่หลักในการจัดการและกำจัดขยะก่อสร้างในโครงการ คือกลุ่มผู้รับเหมา ที่จะต้องดำเนินการจัดการขยะก่อสร้างให้เรียบร้อยและเป็นผลสำเร็จ

การศึกษานี้จึงมุ่งศึกษาทัศนคติและพฤติกรรมต่อกระบวนการจัดการขยะก่อสร้างของกลุ่มผู้รับเหมาในประเทศไทย เพื่อให้ทราบถึง สาเหตุของการเกิดขยะก่อสร้าง แนวทางการดำเนินการเพื่อลดปริมาณการเกิดขยะก่อสร้าง ประโยชน์ของการจัดการขยะก่อสร้าง รวมไปถึงสภาพปัญหาและอุปสรรคจากกระบวนการจัดการขยะก่อสร้างเหล่านั้น อันเป็นภาระที่ส่งผลกระทบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บข้อมูลปริมาณขยะก่อสร้าง

ศึกษาข้อมูลปริมาณขยะก่อสร้างโดยเก็บข้อมูลชนิดและปริมาณขยะก่อสร้างทั้งสิ้น 4 โครงการ พิจารณาเลือกจากโครงการที่เข้าร่วมเกณฑ์การประเมินอาคารเขียว โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นอาคารขนาดใหญ่ตามนิยามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร และเป็นอาคารที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ

การเก็บข้อมูลแบบสัมภาษณ์แนวทางการจัดการขยะก่อสร้างในโครงการก่อสร้าง

ศึกษาที่มาของการเกิดขยะก่อสร้างประเภทต่างๆ และแนวทางการจัดการขยะก่อสร้างของขยะแต่ละประเภท โดยทำการเก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์กลุ่มผู้รับเหมาและกลุ่มที่ปรึกษาโครงการก่อสร้าง โครงสร้างของแบบสัมภาษณ์ เป็นคำถามในลักษณะปลายเปิดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน แบบสัมภาษณ์ส่วนที่ 1 เป็นคำถามเกี่ยวกับข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ให้สัมภาษณ์ และแบบสัมภาษณ์ส่วนที่ 2 เป็นคำถามเกี่ยวกับแนวทางการจัดการขยะก่อสร้างแต่ละประเภทที่ดำเนินการอยู่ในโครงการ ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการดำเนินการ และปัจจัยที่จะช่วยส่งเสริมให้มีการจัดการขยะก่อสร้างอย่างถูกวิธี

การเก็บข้อมูลแบบสอบถามเชิงทัศนคติและพฤติกรรมการจัดการขยะก่อสร้าง

ศึกษาทัศนคติและพฤติกรรมการจัดการขยะก่อสร้างของผู้รับเหมาก่อสร้าง โดยประเด็นศึกษาประกอบด้วย สาเหตุของการเกิดขยะก่อสร้าง แนวทางการจัดการขยะก่อสร้างและการลดปริมาณขยะก่อสร้างและประโยชน์ของการจัดการขยะก่อสร้าง โดยตัวแปรอิสระซึ่งเป็นปัจจัยส่วนบุคคล ที่จะเป็นตัวกำหนดกรอบแนวคิดในการศึกษา ประกอบด้วย กลุ่มประสบการณ์การทำงาน แบ่งเป็นช่วงประสบการณ์ 0-5 ปี, 6-15 ปี และ 15 ปีขึ้นไป กลุ่มตำแหน่งหน้าที่แบ่งเป็น ผู้จัดการโครงการ ผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ก่อสร้าง และผู้ปฏิบัติงานส่วนสำนักงาน และกลุ่มประสบการณ์การทำอาคารเขียว

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการเก็บข้อมูลปริมาณขยะก่อสร้าง

จากการเก็บข้อมูลปริมาณขยะก่อสร้างของอาคารที่เข้าร่วมเกณฑ์การประเมินอาคารเขียว ขยะก่อสร้างที่ถูกบันทึกข้อมูลปริมาณ ประกอบด้วย ขยะทั่วไป คอนกรีต ไม้ แก้ว พลาสติก เหล็ก และกระดาษ โดยทำการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 4 โครงการ (Table 1) พบว่าปริมาณเศษวัสดุที่พบมากที่สุดของแต่ละโครงการ คือ เศษคอนกรีต เนื่องจากการเก็บข้อมูลเป็นการเก็บในหน่วยปริมาตร คอนกรีตซึ่งมีมวลมาก จึงพบในสัดส่วนที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับขยะก่อสร้างประเภทอื่นๆ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยรวมของทั้ง 4 โครงการ พบคอนกรีตในสัดส่วน 68.45% เหล็ก 17.09% ขยะทั่วไป 8.72% เศษไม้ 4.28% กระดาษ 1.27% เศษแก้ว 0.13% และพลาสติก 0.07% ตามลำดับ

Table 1 Composition of construction waste.

EWC code	Waste category	Composition of construction waste				Mean
		Building A	Building B	Building C	Building D	
17 01 01	Concrete	79.29	75.74	64.75	54.00	68.45
17 02 01	Wood	4.23	3.12	0.00	9.76	4.28
17 02 02	Glass	0.02	0.50	0.00	0.00	0.13
17 02 03	Plastic	0.11	0.00	0.00	0.18	0.07
17 04 07	Metal	11.54	18.85	21.99	15.97	17.09
15 01 01	Paper	0.01	0.14	4.61	0.32	1.27
	General waste	4.80	1.65	8.65	19.77	8.72
	Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

สาเหตุที่ทำให้เกิดขยะก่อสร้าง

จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยและการสัมภาษณ์ สามารถรวบรวมประเด็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดขยะก่อสร้างทั้งสิ้น 31 รายการ โดยพิจารณาจากประสบการณ์ในการพบเจอประเด็นสาเหตุที่ทำให้เกิดขยะก่อสร้างจากไม่เคยพบหรือไม่เคยประสบปัญหาดังกล่าว (0) จนถึง พบเจอสาเหตุดังกล่าวเป็นประจำ(4)

การจัดลำดับค่าเฉลี่ย จากทัศนะของกลุ่มผู้รับเหมาพบว่าสาเหตุของการเกิดขยะก่อสร้างที่พบเจอบ่อยที่สุดคือ การปรับหรือเปลี่ยนแปลงแก้ไขแบบระหว่างการก่อสร้าง ทำให้ต้องมีการรื้อแก้งานที่ดำเนินการไปแล้วเกิดเป็นเศษวัสดุก่อสร้างที่ไม่สามารถใช้งานได้อีก ประเด็นสาเหตุที่พบเจอรองลงมาคือ ภาวะกดดันทางเวลาหรือภาวะงานเร่ง ทำให้เกิดการละเลยประเด็นปัญหาเรื่องขยะก่อสร้างในโครงการ และสาเหตุการเปลี่ยนแปลงแบบจากเจ้าของโครงการ ทำให้ต้องมีการรื้อแก้งานเช่นกัน ในขณะที่สาเหตุของการเกิดขยะก่อสร้างที่พบเจอน้อยที่สุดคือ ขาดการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุก่อนการรับมอบทำให้ได้วัสดุที่ไม่มีคุณภาพกลายเป็นขยะเหลือทิ้ง

เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของสาเหตุที่ทำให้เกิดขยะก่อสร้างเพิ่มเติม และลดจำนวนตัวแปรลง ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ ทำให้สามารถแบ่งกลุ่มของชุดสาเหตุปัจจัยได้ทั้งสิ้น 7 กลุ่มหลัก ประกอบด้วย ปัจจัยเงื่อนไขทางสัญญาและนโยบายไม่สนับสนุน; CF1, การจัดเก็บและติดตั้งวัสดุอุปกรณ์ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน; CF2, ขาดการวางแผนและการติดตามระหว่างช่วงดำเนินการ; CF3, การออกแบบที่ไม่คำนึงถึงการก่อสร้างและความผิดพลาดของแบบก่อสร้าง; CF4, วัสดุมีความเสียหาย คุณภาพไม่เป็นไปตามมาตรฐาน; CF5, การเปลี่ยนแปลงแบบอย่างกระทันหันระหว่างการก่อสร้าง; CF6, และความผิดพลาดระหว่างการสั่งซื้อวัสดุ; CF7 (Figure 1)

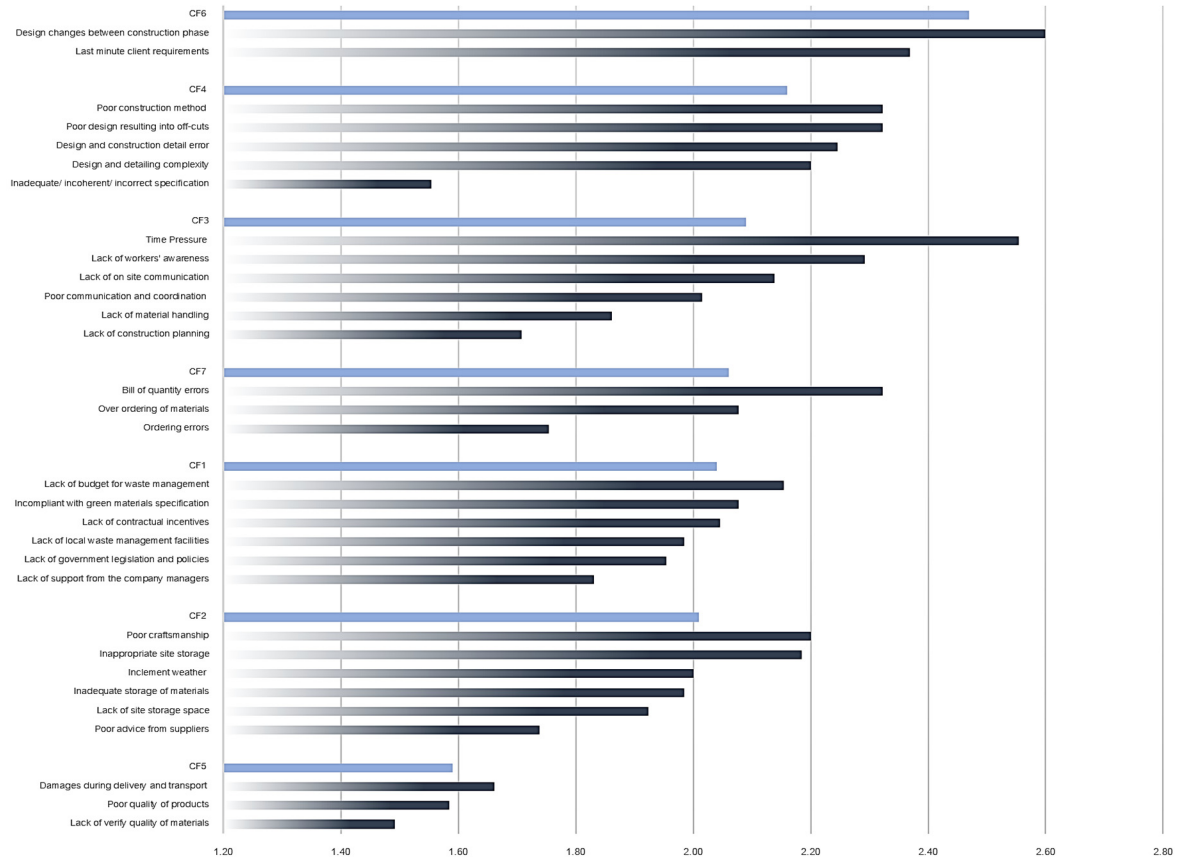


Figure 1 Group factor of construction waste cause

ผลการวิเคราะห์ชุดสาเหตุของการเกิดขยะกับกลุ่มตัวแปรของผู้รับเหมา (Table 2) พบว่า กลุ่มตัวแปรส่วนใหญ่เห็นพ้องไปในทางเดียวกันว่า สาเหตุของการเกิดขยะก่อสร้างที่พบเจอบ่อยคือชุดสาเหตุปัจจัยเรื่องการเปลี่ยนแปลงแบบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohamed Osmani et al., 2006 ที่พบว่าการเปลี่ยนแปลงแบบอย่างกระทันหันจากลูกค้าเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดขยะก่อสร้าง แต่มีกลุ่มประสบการณ์ต่ำกว่า 5 ปี และกลุ่มตำแหน่งงานผู้ปฏิบัติงานส่วนสำนักงาน เห็นว่าสาเหตุของการเกิดขยะก่อสร้างที่พบเจอบ่อยคือกลุ่มปัจจัยเรื่องปัญหาที่เป็นผลสืบเนื่องมาจากการทำแบบ ซึ่งทั้งสองชุดสาเหตุเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้จากกลุ่มผู้รับเหมาเอง ในขณะเดียวกันทุกกลุ่มตัวแปรของผู้รับเหมา พบเจอปัญหาเรื่องคุณภาพของวัสดุน้อยที่สุด เนื่องจากชุดสาเหตุดังกล่าวเป็นชุดปัจจัยที่อยู่ในความรับผิดชอบโดยตรงของผู้รับเหมาทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของวัสดุได้

Table 2 Cause of construction waste: contractors' response mean.

Group	Category of factors	Experiences						Position						Green Building			
		0-5 years		6-15 years		Over 15 years		Manager		Site technical		Office technical		No		Yes	
		Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank
CF6	Changing requirement	2.17	2	2.57	1	2.79	1	2.68	1	2.52	1	2.08	3	2.48	1	2.50	1
CF4	Design error	2.18	1	1.93	6	2.47	2	2.19	5	2.07	2	2.17	1	2.13	2	2.14	4
CF3	Planning and operation	1.67	6	2.27	2	2.35	4	2.36	2	2.02	3	1.82	6	2.02	3	2.23	2
CF7	Material ordering and procurement	1.90	3	2.14	4	2.07	6	2.08	6	2.01	4	2.10	2	2.01	4	2.14	5
CF1	Condition of contract and policies	1.62	5	2.09	5	2.42	3	2.23	4	1.83	6	2.04	4	1.93	6	2.15	3
CF2	Material storage and installation	1.62	4	2.20	3	2.17	5	2.23	3	1.87	5	1.95	5	1.97	5	2.07	6
CF5	Material quality	1.46	7	1.57	7	1.79	7	1.62	7	1.56	7	1.56	7	1.54	7	1.65	7

แนวทางการดำเนินการเพื่อลดปริมาณการเกิดขยะก่อสร้าง

จากการสัมภาษณ์ผู้รับเหมาและที่ปรึกษาโครงการที่อยู่ในพื้นที่โครงการก่อสร้าง ศึกษาที่มาของการเกิดขยะก่อสร้างประเภทต่างๆ และแนวทางการจัดการขยะก่อสร้างแต่ละประเภท พบว่ากระบวนการจัดการขยะที่ดำเนินการอยู่ของกลุ่มผู้รับเหมาในประเทศไทย คือการกำจัดขยะออกจากโครงการก่อสร้างด้วยวิธีการ ว่าจ้างรถบรรทุกเพื่อขนขยะทั้งหมดออกไปยังสถานที่กองเก็บของหน่วยงานเอกชน หรือให้หน่วยงานส่วนท้องถิ่นมารับไปกำจัด และมีบางส่วนที่สามารถแยกขายเพื่อนำไปรีไซเคิลต่อได้ ซึ่งเป็นกระบวนการจัดการขยะในช่วงท้ายของเส้นทาง

แนวทางของการจัดการขยะที่เห็นผลและมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือการลดปริมาณการเกิดขยะโดยป้องกันการเกิดขยะก่อสร้างตั้งแต่ช่วงต้นทาง (Al Hajj et al., 2011) ซึ่งเมื่อพิจารณาผลจากการตอบแบบสอบถามของกลุ่มผู้รับเหมาในประเทศไทย สอบถามทัศนะประเด็นแนวทางการดำเนินการเพื่อลดปริมาณการเกิดขยะก่อสร้าง โดยพิจารณาจากแนวทางที่เห็นว่าเหมาะสมน้อยที่สุด (1) ถึง แนวทางที่เห็นว่าเหมาะสมมากที่สุด (4)

แนวทางการดำเนินการที่กลุ่มผู้รับเหมาในประเทศไทยเห็นว่าเป็นแนวทางที่ช่วยลดปริมาณการเกิดขยะก่อสร้าง คือการจัดทำแผนงานก่อสร้าง ซึ่งเป็นการควบคุมคุณภาพงานทั้งโครงการ ส่วนแนวทางการดำเนินการอื่นๆที่กลุ่มผู้รับเหมาเห็นว่าเหมาะสมได้แก่ การควบคุมประสานงานระหว่างผู้ควบคุมงานและผู้ปฏิบัติงานอย่างใกล้ชิด การทำความเข้าใจและศึกษาแบบก่อนลงมือทำงาน การออกข้อกำหนดการบริหารจัดการขยะ และการจัดอบรมให้ความรู้เรื่องการจัดการขยะก่อสร้างให้กับผู้ปฏิบัติงาน ในขณะที่แนวทางที่กลุ่มผู้รับเหมามองว่าสิ่งที่

ไม่ใช่ประเด็นสำคัญต่อกระบวนการจัดการขยะก่อสร้างคือ การบันทึกปริมาณขยะในโครงการก่อสร้าง และการเลือกใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เมื่อนำทัศนะของผู้รับเหมาในประเทศไทยประเด็นแนวทางการดำเนินการเพื่อลดปริมาณการเกิดขยะก่อสร้าง มาวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจเพื่อหาความสัมพันธ์กับกลุ่มตัวแปรของผู้รับเหมา ได้ชุดแนวทางปัจจัย 4 กลุ่ม ประกอบด้วย กระบวนการกำจัดขยะ; MS1, การวางแผนและการจัดการ; MS2, การเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์สนับสนุน; MS3 และปัจจัยด้านความรู้และการตระหนักต่อสิ่งแวดล้อม; MS4 (Figure 2)

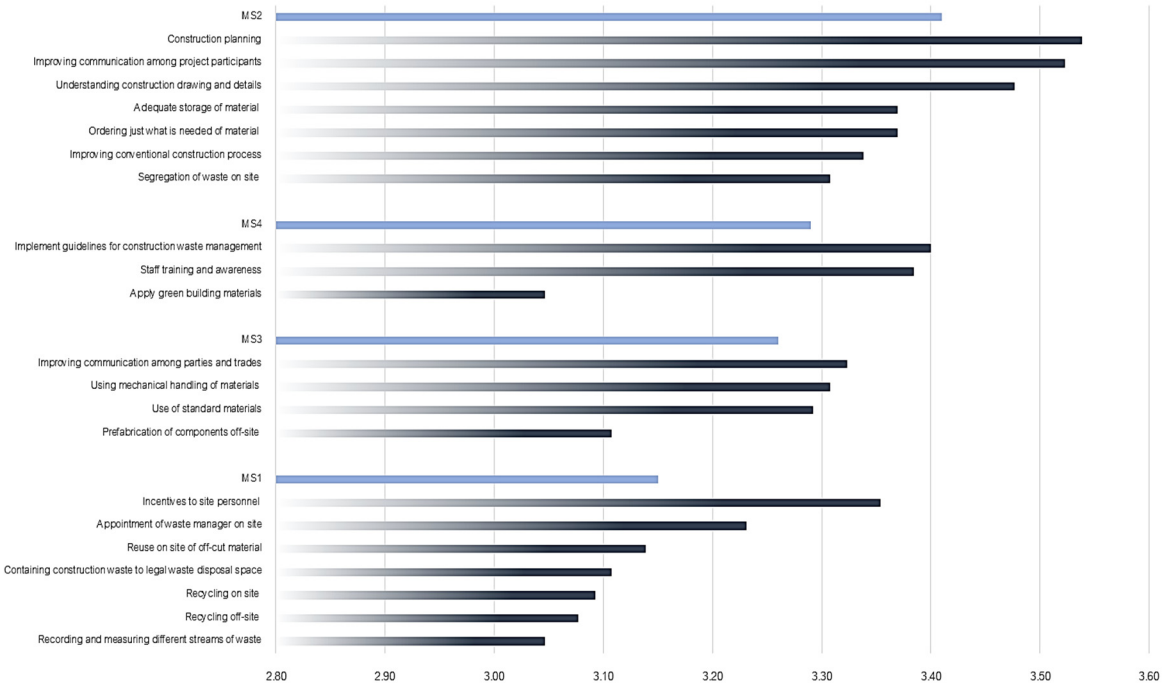


Figure 2 The ranking of implementation of construction waste minimization measures.

ผลการวิเคราะห์ชุดแนวทางการจัดการขยะกับกลุ่มตัวแปรผู้รับเหมา (Table 3) พบว่า กลุ่มตัวแปรเกือบทั้งหมดเห็นพ้องไปในทางเดียวกันว่าแนวทางที่เห็นว่าเหมาะสมและทำได้ดีที่สุดคือ ชุดแนวทางที่เกี่ยวเนื่องกับช่วงการวางแผนและการจัดการ แต่มีกลุ่มตำแหน่งงานวิศวกรประจำสำนักงาน เห็นว่าแนวทางที่เหมาะสมคือกลุ่มแนวทางของการให้ความรู้และให้ตระหนักต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ดี ชุดแนวทางทั้ง 2 กลุ่มเป็นชุดแนวทางที่อยู่ในช่วงต้นทาง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Al Hajj et al., 2011 กล่าวว่าการดำเนินการที่มีผลทำให้ลดการเกิดขยะที่ดีคือ การป้องกันการเกิดขยะตั้งแต่ต้น โดยการวางแผนการสั่งซื้อวัสดุเท่าที่จำเป็นและการจัดอบรมให้ความรู้แก่ผู้ปฏิบัติงานเพื่อให้เกิดความตระหนักรับรู้ในปัญหาและแนวทางการจัดการอย่างถูกต้อง

Table 3 Construction waste minimization strategies.

Group	Category of strategies	Experiences						Position						Green Building			
		0-5 years		*6-15 years*		*Over 15 years*		*Manager*		*Site technical*		*Office technical*		*No*		*Yes*	
		Mean	*Rank*	*Mean*	*Rank*	*Mean*	*Rank*	*Mean*	*Rank*	*Mean*	*Rank*	*Mean*	*Rank*	*Mean*	*Rank*	*Mean*	*Rank*
MS2	Planing and operation	3.33	1	3.54	1	3.28	1	3.46	1	3.40	1	3.38	3	3.35	1	3.54	1
MS4	Knowledge and awareness	3.29	2	3.36	3	3.10	3	3.33	3	3.14	3	3.49	1	3.20	2	3.42	2
MS3	Materials optimization	3.07	4	3.37	2	3.23	2	3.35	2	3.09	4	3.40	2	3.19	3	3.34	3
MS1	Waste disposal	3.18	3	3.23	4	2.93	4	3.04	4	3.15	2	3.34	4	3.08	4	3.28	4

ประโยชน์ของการจัดการขยะก่อสร้างที่เหมาะสม

การศึกษาประโยชน์ของการจัดการขยะก่อสร้าง วิเคราะห์ความสัมพันธ์กับกลุ่มตัวแปรของผู้รับเหมา (Table 4) พบว่า กลุ่มตัวแปรส่วนใหญ่เห็นพ้องไปในทางเดียวกันว่า การจัดการขยะก่อสร้างที่เหมาะสมจะช่วยส่งเสริมภาพลักษณ์ขององค์กรมากที่สุด แต่กลุ่มประสบการณ์ต่ำกว่า 5 ปี เห็นว่า การจัดการขยะก่อสร้างที่เหมาะสมจะช่วยทำให้สภาพแวดล้อมภายในโครงการสะอาดเรียบร้อย และกลุ่มตำแหน่งผู้จัดการโครงการเห็นว่าการจัดการขยะก่อสร้างที่เหมาะสมช่วยส่งผลดีด้านสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ ในขณะที่กลุ่มประสบการณ์มากกว่า 15 ปี เห็นว่าส่งผลดีในหลายๆด้านเท่ากัน ได้แก่ ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดและขนส่งขยะก่อสร้าง ช่วยลดปริมาณขยะก่อสร้างกองเก็บในพื้นที่สาธารณะ และช่วยอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม นั่นแสดงให้เห็นว่าผู้ที่มีประสบการณ์มากและอยู่ในตำแหน่งฝ่ายบริหาร ให้ความสำคัญกับประเด็นทางด้านสิ่งแวดล้อมมากกว่าประเด็นทางด้านภาพลักษณ์ขององค์กร

Table 4 The racking of construction waste minimization benefits.

Group	Benefits of construction waste minimization	Experiences						Position						Green Building			
		0-5 years		6-15 years		Over 15 years		Manager		Site technical		Office technical		No		Yes	
		Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank	Mean	Rank
BW4	Enhancing of image of the company	4.14	2	4.43	1	4.43	5	4.32	4	4.23	1	4.62	1	4.26	1	4.50	1
BW2	Cleaner and safe site conditions	4.24	1	4.27	2	4.43	5	4.41	2	4.10	2	4.54	2	4.21	2	4.45	2
BW8	Protection of the environment	4.00	5	4.17	4	4.43	1	4.45	1	3.83	5	4.46	4	4.07	5	4.36	3
BW3	Saving cost of disposal and transport	4.00	4	4.17	3	4.43	1	4.32	3	3.97	3	4.38	6	4.09	4	4.32	4
BW5	Reducing construction waste to landfill	4.14	2	4.00	5	4.43	1	4.23	5	3.90	4	4.54	2	4.12	3	4.18	5
BW7	Saving energy of materials life cycle	3.86	6	3.87	6	4.14	4	3.95	6	3.67	6	4.46	4	3.91	6	3.95	6
BW6	Waste management market	3.52	8	3.40	7	3.50	5	3.45	7	3.27	8	3.92	7	3.42	7	3.55	7
BW1	Increased profit	3.57	7	3.27	8	3.36	8	3.18	8	3.30	7	3.92	7	3.35	8	3.45	8

หากพิจารณาภาพรวมของกลุ่มผู้รับเหมาในประเทศไทยเห็นว่า การจัดการขยะก่อสร้างในโครงการ ช่วยส่งเสริมภาพลักษณ์ที่ดีขององค์กรมากที่สุด แต่ส่งผลน้อยในประเด็นทางด้านผลประกอบการขององค์กร ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลของ Al Hajj et al., 2011 ที่พบว่า ประเด็นทางด้านผลประกอบการขององค์กรนั้นเป็นประโยชน์ที่ได้จากการจัดการขยะก่อสร้าง ส่วนประเด็นภาพลักษณ์ขององค์กร อยู่ในอันดับท้ายๆ นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวการที่จะช่วยส่งเสริมให้มีการจัดการขยะก่อสร้างอย่างเหมาะสมในประเทศไทย ยังเป็นกลุ่มตัวแปรที่ส่งเสริมภาพลักษณ์เชิงธุรกิจขององค์กร

สรุป

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาทัศนคติและพฤติกรรมของผู้รับเหมาก่อสร้างในประเทศไทย ประเด็นสาเหตุที่ทำให้เกิดขยะก่อสร้าง แนวทางการลดการเกิดขยะก่อสร้าง และประโยชน์ที่ได้จากการจัดการขยะก่อสร้าง

กลุ่มผู้รับเหมาเห็นว่าพฤติกรรมที่ทำให้เกิดขยะก่อสร้างในโครงการก่อสร้างมากที่สุด คือมีการปรับแบบหรือเปลี่ยนแปลงแบบอย่างกระทันหันในระหว่างการก่อสร้าง ทำให้ต้องมีการรื้อแก้งานที่ดำเนินการไปแล้ว ซึ่งเป็นสาเหตุที่พบเจออยู่เสมอและไม่สามารถควบคุมได้ ด้านแนวทางการจัดการขยะก่อสร้างที่กลุ่มผู้รับเหมาเห็นว่าสามารถทำได้และเกิดผลมากที่สุดคือการจัดการในช่วงต้นทาง เพื่อลดปริมาณการเกิดขยะก่อสร้างในโครงการโดยการวางแผนงานก่อสร้างให้ครอบคลุมการวางนโยบายการจัดการวัสดุในโครงการ ส่วนภาพลักษณ์ที่ดีขององค์กรเป็นประเด็นที่ผู้รับเหมาในประเทศไทยเห็นว่าได้รับประโยชน์มากที่สุดจากการจัดการขยะก่อสร้าง

ปัจจัยส่วนบุคคลของกลุ่มผู้รับเหมาที่มีผลต่อทัศนคติและพฤติกรรมการจัดการขยะก่อสร้างที่แตกต่างจากกลุ่มอื่นๆ กลุ่มผู้ปฏิบัติงานส่วนสำนักงานและกลุ่มผู้ที่มีประสบการณ์ต่ำกว่า 5 ปี เห็นว่าสาเหตุที่เกี่ยวเนื่องจากการออกแบบและความผิดพลาดของแบบ เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดขยะก่อสร้าง และเห็นว่า การให้ความรู้แก่ผู้ปฏิบัติงานเป็นแนวทางการจัดการที่จะช่วยลดการเกิดขยะที่เหมาะสมมากที่สุด ในขณะที่กลุ่มผู้ที่มีประสบการณ์มากกว่า 15 ปี และกลุ่มผู้จัดการโครงการ ได้ให้ความสำคัญกับประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมมากที่สุด

พฤติกรรมและแนวทางการจัดการขยะก่อสร้างของกลุ่มผู้รับเหมาในประเทศไทยเป็นแนวทางเชิงรูปธรรมมุ่งไปที่การกำจัดขยะออกจากโครงการก่อสร้าง แต่ในปัจจุบันมีเครื่องมือ Building Information Modelling (BIM) ที่สามารถควบคุมกระบวนการก่อสร้างได้ตลอดทั้งโครงการ (Mohamad Osmani, 2011) ตั้งแต่กระบวนการออกแบบ การถอดปริมาณวัสดุ การก่อสร้าง การใช้งานอาคาร ตลอดจนการบำรุงรักษา เพราะไม่เพียงแต่จะช่วยลดปัญหาขยะจากการก่อสร้างแต่ยังช่วยดูแลตลอดวัฏจักรชีวิตของอาคารและช่วยประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอาคาร เป็นการก่อสร้างอย่างยั่งยืนโดยแท้จริง

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2547. **การจัดการขยะมูลฝอยชุมชนอย่างครบวงจร คู่มือสำหรับผู้บริหารองค์การปกครองส่วนท้องถิ่น**. พิมพ์ครั้งที่ 4. โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, กรุงเทพฯ.

โชคดี ยี่แพร, ต่อตระกูล ยมนาค และ ทิพวรรณ บุณย์เพิ่ม. 2554. การจัดการขยะจากการก่อสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน. **วารสารการจัดการสมัยใหม่** 9(1): 56-68.

นิรัติศัย ทุมวงษา. 2559. **แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2559-61 ธุรกิจรับเหมาก่อสร้าง**. Krungsri Research. 1-6

มติชน. 2551. กรุงเทพฯ: 19 พฤษภาคม 2551. แหล่งที่มา: OK Nation Blog: http://oknation.nationtv.tv/blog/nampik/2008/05/19/entry-1

สำนักสิ่งแวดล้อม. 6 พฤศจิกายน 2557. **สสล. ให้บริการกำจัดขยะก่อสร้าง เปิดให้บริการฟรี**.แหล่งที่มา: http://203.155.220.174/modules.php?name=activeshow_mod&file=article& asid=685

สุชา กิตติวรารัตน์ และ ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์. 2012. การจัดการเพื่อลดเศษวัสดุก่อสร้างในงานสถาปัตยกรรมของบ้านพักอาศัยขนาดเล็ก. **JARS** 9(2): 81-94.

Al Hajj Assem and Hamani Karima. 2011. Material waste in the UAE construction industry: Main causes and minimization practices. **Architectural Engineering and Design Management** 7(4): 221-235.

Mohamed Osmani. 2011. Chapter 15 Construction waste. **Waste: A Handbook for Management**: 207-218

Mohamed Osmani, Jacqueline Glass and Andrew Price. 2006. Architect and contractor attitudes to waste minimization. **Waste and Resource Management** 159: 65-72.

Rawshan Ara Begum, Chamhuri Siwar, Joy Jacqueline Pereira and Abdul Hamid Jaafar. 2006. A Benefit Cost Analysis on the Economic Feasibility of Construction Waste Minimisation: The Case of Malaysia. **Resources conservation & Recycling** 48: 86-98.

ผลของอุณหภูมิและแอมโมเนียต่อระดับสุขภาพปะการัง กรณีศึกษาปะการังโขด เกาะสีชัง ประเทศไทย

The Effects of Temperature and Ammonia to Coral Health Level: A Case Study of Hump Coral *(Porites sp.)* at Sichang Island, Thailand

บุษปกรณ์ อุดมทรัพย์[1*] เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ[1] และ สมภพ รุ่งสุภา[2]

Bussapakorn Udomsap[1*], Petchporn Chawakitchareon[1] and Sompop Rungsupa[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและแอมโมเนียต่อระดับสุขภาพปะการังโขด โดยใช้การทดสอบความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน ที่ระยะเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 30 และ 33 องศาเซลเซียส ร่วมกับความเข้มข้นแอมโมเนีย 0 0.05 0.07 และ 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ไม่สามารถคำนวณค่าความเป็นพิษเฉียบพลันของความเข้มข้นแอมโมเนียที่ทำให้ปะการังเกิดการฟอกขาวหรือตายลงครึ่งหนึ่ง (LC_{50}) ได้ เนื่องจากพบว่าสุขภาพปะการังไม่อยู่ในระดับที่เสื่อมโทรมหรือร้อยละการตายมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 50 แต่ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส เวลา 48 ชั่วโมง สามารถหาค่า LC_{50} ได้ เนื่องจากปะการังมีร้อยละการตายมากกว่าร้อยละ 50 ดังนั้นค่า LC_{50}-48 ชั่วโมง ในการศึกษานี้ เท่ากับ 0.054 มิลลิกรัมต่อลิตร

ABSTRACT

This research aimed to study the effects of temperature and ammonia to Coral Health Level of hump coral *(Porites sp.)* by using acute toxicity test. The acute effect of temperature and ammonia to disc coral were monitoring at 24 hr. and 48 hr. The experiments were carried out at temperature 30ºC and 33ºC. The concentration of ammonia was varied at 0 0.05 0.07 and 0.1 mgN/L. respectively. The experiments were carried out in triplicate. The experimental results indicated that, at temperature 30ºC, 24 hr. and 48 hr. and temperature 33ºC, 24 hr., the acute toxicity of coral bleaching (50% Lethal Concentration: LC_{50}) cannot be investigated. This is because the coral health was not lower enough for declining or the mortality percentage was not below 50%. On the other hand, at the temperature 33ºC, 48 hr., the acute toxicity of coral bleaching (LC_{50}) can be evaluated. The experimental results strongly indicated that the mortality percentage was more than 50%. Therefore, the LC_{50}-48 hr. in this study was equal to 0.054 mg/L.

Key Words :temperature, ammonia, coral health level, coral bleaching, LC_{50}

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[2]สถาบันวิจัยทรัพยากรทางน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

คำนำ

ปะการังเป็นสัตว์ทะเลที่ไม่มีกระดูกสันหลัง จัดอยู่ในไฟลัมไนดาเรีย (Cnidaria) มีโครงสร้างเป็นหินปูน รูปทรงต่างๆ เช่น เป็นแผ่น ก้อนหรือมีกิ่งก้าน ปะการังได้รับอาหารจากสารอาหารที่สาหร่ายซูแซนเทลลีทำการสังเคราะห์แสงสร้างขึ้น ปะการังและสาหร่ายจะอยู่ร่วมกันแบบพึ่งพาอาศัย โดยสาหร่ายจะช่วยเร่งกระบวนการสร้างหินปูนและสร้างสีสันให้แก่ตัวปะการัง ส่วนปะการังก็ให้ที่อยู่แก่สาหร่าย ปะการังจะเติบโตได้ดีในบริเวณที่น้ำทะเลมีอุณหภูมิคงที่ไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส (Chankong, 2014) เมื่อสภาวะแวดล้อมในทะเลมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีสภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น ความเค็มของน้ำทะเลลดลง (Rungsupa et al., 2017) สาหร่ายจะผลิตสารที่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อของปะการัง ปะการังจะเกิดความเครียดและขับสาหร่ายออกจากเนื้อเยื่อ ทำให้ปริมาณรงควัตถุในปะการังลดลง (Fitt et al., 2000) นอกจากอุณหภูมิและความเค็มที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ส่งผลต่อปะการังแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลให้สุขภาพปะการังเสื่อมโทรม ซึ่งแอมโมเนียอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความเครียดและก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อปะการังเช่นกัน (Hansuebsai et al., 2017) ในปัจจุบันอุณหภูมิของน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ทำให้สุขภาพของปะการังเสื่อมโทรม และจากรายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อมภาคตะวันออก พ.ศ.2558 พบว่าพื้นที่ที่พบปะการังของจังหวัดชลบุรี มีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนเกินมาตรฐาน คือ มากกว่า 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวอยู่ในความเสี่ยงจากคุณภาพน้ำทะเลที่เสื่อมโทรมลง นอกจากนี้ข้อมูลในปัจจุบันเกี่ยวกับผลของแอมโมเนียที่ปลอดภัยต่อสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังมีจำกัดมาก จึงแนะนำให้ใช้เกณฑ์เดียวกับปลาได้ด้วยความระมัดระวัง (Lawson, 1995) ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและแอมโมเนียต่อระดับสุขภาพของปะการังโขดแบบเฉียบพลัน (Acute Toxicity Test) โดยประเมินระดับสุขภาพปะการัง (Coral Health Index) ด้วยแผนภูมิสุขภาพปะการัง (Coral Health Chart) ซึ่งเป็นแผนภูมิสีมาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิง ที่มีราคาไม่แพง เป็นเครื่องมือที่ใช้ได้ง่ายและสามารถใช้ได้ในหลายสถานการณ์ นอกจากนี้ยังสามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงของปะการังได้ในหลายสภาวะ (Siebeck et al., 2006) และคำนวณค่าความเป็นพิษเฉียบพลันของความเข้มข้นแอมโมเนียที่ทำให้ปะการังเกิดการฟอกขาวหรือตายลงครึ่งหนึ่ง (LC_{50}) โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบโพรบิท (Probit Analysis) เพื่อนำผลที่ได้มาเป็นข้อมูลเบื้องต้นของระดับแอมโมเนียที่ปลอดภัยต่อสุขภาพปะการังโขดของพื้นที่เกาะสีชังที่เป็นตัวแทนของปะการังแบบก้อน เนื่องจากปะการังแต่ละชนิดทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงได้แตกต่างกัน (หรรษา จรรย์แสง, 2542) และเพื่อประโยชน์ในการฟื้นฟูปะการังในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาผลของอุณหภูมิและแอมโมเนียแบบเฉียบพลัน

ปรับสภาพปะการังโขดในบ่อน้ำทะเลกรองที่มีการให้อากาศและน้ำไหลเวียนตลอดเวลา เป็นระยะเวลา 7 วัน ก่อนนำมาทดลอง แล้วเลือกปะการังขนาดระหว่าง 3-4 เซนติเมตร ที่มีสภาพภายนอกปกติ มีสีเทียบกับแผนภูมิสุขภาพปะการังอยู่ในระดับ 5 ถึง 6 และไม่พบการฟอกขาวบนชิ้นปะการัง นำปะการังมาใส่ในตู้กระจกที่เติมน้ำทะเลกรองสะอาดตู้ละ 3 ชิ้น ให้อากาศและปรับอุณหภูมิเป็น 30 และ 33 องศาเซลเซียส ด้วย Grass Heating Rod โดยควบคุมความเค็มและความเป็นกรด-ด่างให้คงที่ แล้วเตรียมแอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 0 0.05 0.07 และ 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ใส่ลงในตู้กระจก ความเข้มข้นละ 3 ตู้ (3 ซ้ำ)

ทำการวัดอุณหภูมิ ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง ความหนาแน่นสาหร่ายซูแซนเทลลีในน้ำ (Zooxanthellae density) และบันทึกระดับสุขภาพปะการัง ที่เวลา 0 12 24 และ 48 ชั่วโมง ก่อนเปลี่ยนเป็นน้ำทะเลปกติที่ไม่เติมแอมโมเนีย และบันทึกระดับสุขภาพปะการังต่อที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง เพื่อติดตามการฟื้นตัว (recovery) ของชิ้นปะการังที่มีสุขภาพต่ำกว่าระดับ 3 หรือมีการฟอกขาวทั้งชิ้นและบางส่วน

การประเมินระดับสุขภาพปะการัง

ทำการประเมินระดับสุขภาพปะการังจากแผนภูมิสุขภาพปะการัง (Coral Health Chart) (Figure 1) ที่กำหนดกลุ่มสีปะการังเป็น 4 สี และแบ่งระดับสุขภาพเป็น 6 ระดับ (Siebeck, 2006) โดยสีระดับที่ 6 เป็นตัวแทนของปะการังที่มีสุขภาพดี (Best Health) และสีระดับที่ 1 เป็นตัวแทนของปะการังที่มีสุขภาพเสื่อมโทรม (Worst Health) แล้วเปลี่ยนระดับสีที่ประเมินได้ให้เป็นร้อยละสุขภาพและร้อยละการตายของปะการัง (Table 1)

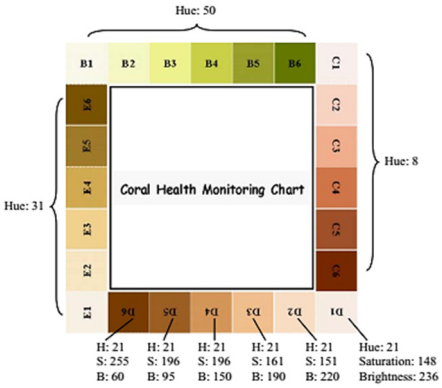


Figure 1 Coral Health Chart

Table 1 Percent Healthy of Coral Health Chart

Raw data	Data transformation	Remark	Percent Healthy	Percent Mortality
D1	1	Worst health	16.67	83.33
D2	2	Bad health	33.33	66.67
D3	3	Poor health	50.00	50.00
D4	4	Fair health	66.67	33.33
D5	5	Good health	83.33	16.67
D6	6	Best health	100.00	0

การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการบันทึกภาพและบันทึกจำนวนปะการังที่มีสีต่ำกว่าระดับ 3 แล้วนำค่าที่บันทึกได้แปลงเป็นร้อยละสุขภาพและร้อยละการตายของปะการัง เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทำให้ปะการังเกิดการฟอกขาวหรือตายลงครึ่งหนึ่ง (LC_{50}) จากการทดสอบค่าความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (Acute toxicity test) ที่เวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบโพรบิท (Probit Analysis) (Finney, 1952)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 30 และ 33 องศาเซลเซียส ร้อยละสุขภาพและร้อยละการตายของปะการังที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวม 0 0.05 0.07 และ 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (Table 2 and 3) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง ปะการังมีสุขภาพอยู่ในระดับพอใช้ถึงปานกลาง (มีสีอยู่ในระดับมากกว่า 3 ขึ้นไป) คิดเป็นร้อยละ 58.33-66.67 และร้อยละ 55.55-66.67 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ปะการังมีสุขภาพอยู่ในระดับพอใช้ถึงดี คิดเป็นร้อยละ 55.55-66.67 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละการตายของทั้ง 3 สภาวะ พบว่าร้อยละการตายของปะการังมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 50 จึงไม่สามารถนำไปหาค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทำให้ปะการังเกิดการฟอกขาวหรือตายลงครึ่งหนึ่ง (LC_{50}) ได้ แต่ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส เวลา 48 ชั่วโมง ปะการังมีสุขภาพอยู่ในระดับแย่ถึงปานกลาง คิดเป็นร้อยละ 36.1-63.89 และที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส เวลา 48 ชั่วโมง ร่วมกับความเข้มข้นแอมโมเนีย 0.07 และ 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ปะการังมีค่าร้อยละการตายมากกว่าร้อยละ 50 คือ ร้อยละ 58.32 และ 63.90 ตามลำดับ จึงสามารถคำนวณหาค่า LC_{50} ได้ โดยที่แอมโมเนียความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ทำให้ปะการังมีร้อยละการตายมากที่สุด เท่ากับ ร้อยละ 63.90 ซึ่งเมื่อนำค่าร้อยละการตายของปะการังที่ตายมากกว่าครึ่งหนึ่งไปคำนวณหาค่า LC_{50} โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบโพรบิท (Probit Analysis) (Figure 2) พบว่าที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทำให้ปะการังเกิดการฟอกขาวหรือตายลงครึ่งหนึ่ง (LC_{50}) ที่ 48 ชั่วโมง คือ 0.054 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับค่าแอมโมเนียที่แนะนำในการเลี้ยงสัตว์น้ำและปะการังว่าควรน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Kallqvist; Svenson, 2013) แต่สำหรับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งเพื่อการอนุรักษ์ปะการังที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง เนื่องจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.054 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถส่งผลทำให้สุขภาพปะการังเสื่อมโทรมมากกว่าร้อยละ 50 นอกจากนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nozawa (2012) ที่พบว่าอุณหภูมิที่สูงกว่า 30 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้จำนวนสาหร่ายซูแซนเทลลีที่อาศัยอยู่ในเนื้อเยื่อของปะการังลดลง และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำทะเลจากอุณหภูมิปกติที่พบปะการัง 1-2 องศาเซลเซียส จะทำให้ปะการังเกิดการฟอกขาวได้ (Buchheim, 2016) และในประเทศไทยมีรายงานว่าปี 2553 อุณหภูมิน้ำทะเลบริเวณเกาะภูเก็ตเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิปกติ 29 องศาเซลเซียส เป็น 33.5 องศาเซลเซียส ติดต่อกันเป็นเวลา 30 วัน ทำให้ปะการังบริเวณนั้นฟอกขาวบางส่วนหรือทั้งหมด (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2556) และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Udomsap et al. (2017) พบว่า ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทำให้ปะการังเกิดการฟอกขาวหรือตายลงครึ่งหนึ่ง (LC_{50}) ของปะการังจานที่เป็นตัวแทนของปะการังแบบแผ่น มีเท่ากับ 0.075 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ค่า LC_{50} ของปะการังโขดในการศึกษาครั้งนี้ที่เป็นตัวแทนของปะการังแบบก้อน มีค่าเท่ากับ 0.054 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าปะการังแต่ละชนิดทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงได้แตกต่างกัน

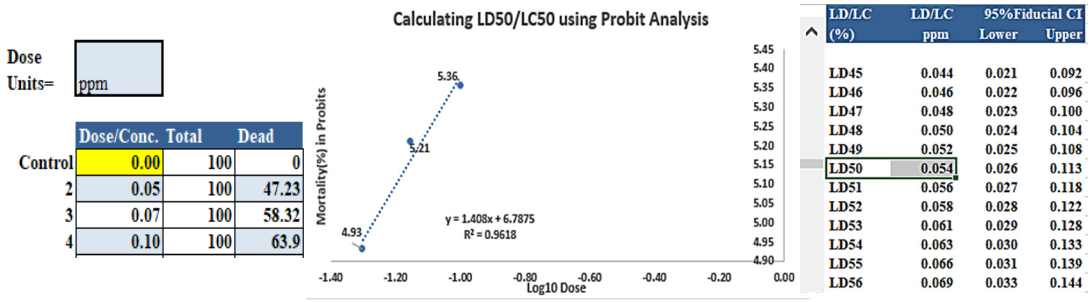


Figure 2 Probit Analysis

Table 2 Percent Healthy and Percent Mortality at 30˚C

Temperature 30˚C	Healthy level (%)				Mortality (%)
Ammonia (mgN/L)	0 hr.	12 hr.	24 hr.	48 hr.	48 hr.
0	83.33	83.33	66.67	66.67	33.33
0.05	83.33	83.33	66.67	63.89	36.11
0.07	83.33	80.55	63.89	61.11	38.89
0.1	83.33	74.99	58.33	55.55	44.45

Table 3 Percent Healthy and Percent Mortality at 33˚C

Temperature 33˚C	Healthy level (%)				Mortality (%)
Ammonia (mgN/L)	0 hr.	12 hr.	24 hr.	48 hr.	48 hr.
0	83.33	83.33	66.67	63.89	36.11
0.05	83.33	80.55	63.89	52.76	47.23
0.07	83.33	80.55	58.33	41.68	58.32
0.1	83.33	63.89	55.55	36.10	63.90

จากการวัดค่าความหนาแน่นสาหร่ายซูแซนเทลลีในน้ำ พบว่าที่เวลา 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.05 และ 0.07 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ปะการังมีการขับสาหร่ายออกมาในน้ำมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปคาดว่าปะการังสามารถปรับตัวได้ในสภาวะใหม่ จึงขับสาหร่ายน้อยลง ที่เวลา 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสทุกความเข้มข้นของแอมโมเนีย ความหนาแน่นสาหร่ายมีค่าใกล้เคียงกันระหว่าง 10.67-19.33 เซลล์ต่อมิลลิตร เมื่อเวลาและความเข้มข้นของแอมโมเนียที่มากขึ้น ปะการังจะขับสาหร่ายออกจากเนื้อเยื่อเพิ่มมากขึ้น โดยที่เวลา 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร พบเซลล์สาหร่ายซูแซนเทลลีมากที่สุด เท่ากับ 23.17 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ซึ่งสัมพันธ์กับร้อยละระดับสุขภาพปะการังที่เสื่อมโทรมมากที่สุด ทั้งนี้การขับสาหร่ายออกจากเนื้อเยื่อของปะการังอาจขึ้นกับการปรับตัวและสุขภาพของปะการังชิ้นนั้นๆด้วย (Figure 3)

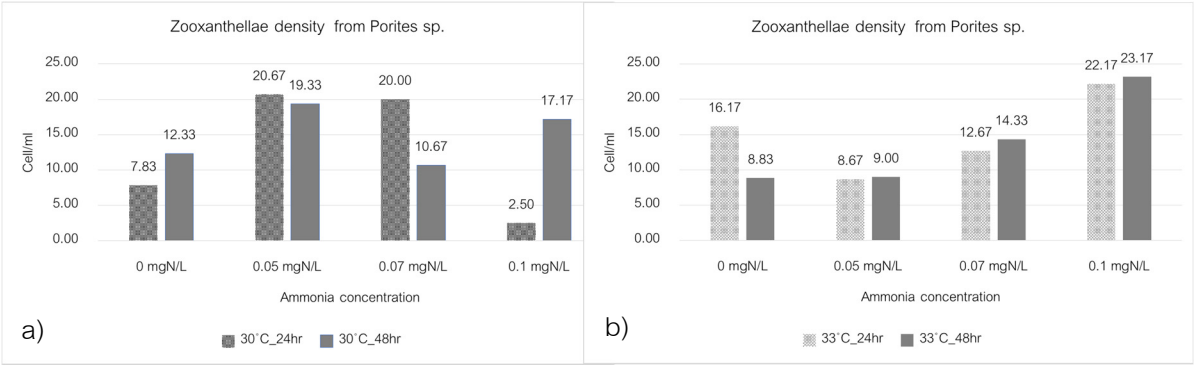


Figure 3 Zooxanthellae density from *Porites sp.* a) at 30˚C b) at 33˚C

และจากการสังเกตพบว่าหากปะการังอยู่ในสภาวะที่ทำให้เกิดความเครียด ปะการังจะมีกลไกในการป้องกันตัวจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง โดยการปล่อยเมือกออกมา (Kellogg, 2004) ยิ่งอุณหภูมิและความเข้มข้นแอมโมเนียที่สูงปะการังก็ยิ่งปล่อยเมือกออกมามาก ทำให้สีของปะการังเริ่มซีดจางลง เนื่องจากการปล่อยเมือกทำให้เนื้อเยื่อของปะการังหลุดออกมาส่งผลให้จำนวนสาหร่ายซูแซนเทลลีในเนื้อเยื่อปะการังลดลง (Kerswell; Jones, 2003) (Figure 4) โดยที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เป็นสภาวะที่ทำให้ปะการังสุขภาพเสื่อมโทรมมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าปะการังมีการขับสาหร่ายออกจากเนื้อเยื่อมากที่สุด ดังนั้นแอมโมเนียจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ปะการังเกิดการฟอกขาวหรือสุขภาพเสื่อมโทรม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Baohua et al. (2004) ที่พบว่า อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ปะการังจะขับสาหร่ายออกจากเนื้อเยื่อมามากหลังชั่วโมงที่ 18 และแอมโมเนียทำให้เกิดการฟอกขาวมากกว่าไนเตรท นอกจากนี้ปะการังที่ฟอกขาวสามารถฟื้นตัวได้เป็นปกติหรืออาจฟื้นตัวได้เพียงบางส่วน ขึ้นอยู่กับสาเหตุที่ทำให้เกิดการฟอกขาว รวมไปถึงระดับความรุนแรงของความเครียดที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายภายในตัวปะการัง (Arthur et al., 2006) แต่จากการทดลองพบว่าปะการังไม่สามารถฟื้นตัวจากการฟอกขาวได้

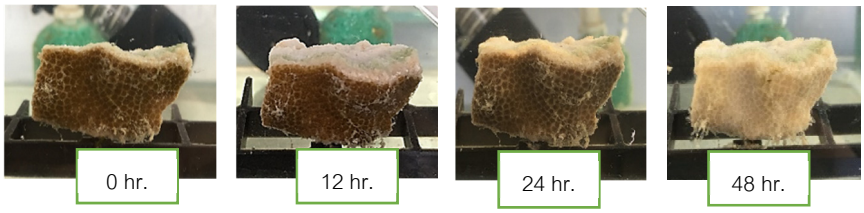


Figure 4 Coral Bleaching (Ammonia concentration 0.1 mgN/L at 0, 12, 24 and 48 hr.)

สรุป

จากผลการศึกษาผลของอุณหภูมิและแอมโมเนียแบบเฉียบพลันต่อระดับสุขภาพปะการังโขด ที่อุณหภูมิ 30 และ 33 องศาเซลเซียส ร่วมกับความเข้มข้นแอมโมเนียที่ 0 0.05 0.07 และ 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ระยะเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง โดยคำนวณหาค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทำให้ปะการังเกิดการฟอกขาวหรือตายลงครึ่งหนึ่ง (LC_{50}) จากการทดสอบค่าความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (Acute toxicity test) ที่เวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบโพรบิท (Probit Analysis) พบว่าที่อุณหภูมิ 30 และ 33 องศาเซลเซียส ถ้ามีความเข้มข้นของแอมโมเนียร่วมด้วยจะทำให้ปะการังเกิดการฟอกขาวหรือสุขภาพเสื่อมโทรมเพิ่มมากขึ้นตามระดับความ

เข้มข้นของแอมโมเนีย โดยที่เวลา 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส ร่วมกับความเข้มข้นแอมโมเนีย 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ทำให้ปะการังมีร้อยละการตายสูงสุด เท่ากับร้อยละ 63.9 ซึ่งสัมพันธ์กับสีของปะการังที่ซีดจางลง แสดงให้เห็นว่าปะการังมีการขับสาหร่ายออกจากเนื้อเยื่อ โดยวัดค่าเซลล์สาหร่ายซูแซนเทลลีได้มากที่สุด เท่ากับ 23.17 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และสามารถคำนวณหาค่า LC_{50}- 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส ได้ เนื่องจากปะการังเกิดการฟอกขาวหรือมีสุขภาพเสื่อมโทรมมากกว่าร้อยละ 50 เมื่อนำไปคำนวณค่า LC_{50}-48 ชั่วโมง จึงมีค่าเท่ากับ 0.054 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนที่สภาวะอื่นไม่พบปะการังที่เกิดการฟอกขาวหรือสุขภาพเสื่อมโทรมมากกว่าร้อยละ 50 จึงไม่สามารถคำนวณค่า LC_{50} ได้ และจากการศึกษาการฟื้นตัวของปะการังในน้ำทะเลปกติ พบว่าปะการังไม่สามารถฟื้นตัวได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” จากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของสถานีวิจัยทางทะเล เกาะสีชัง ชลบุรี สำหรับการช่วยเหลือและสนับสนุนในการทดลอง และขอขอบคุณการสนับสนุนจาก Global Environmental System Leaders Program, Keio University, Japan

เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2013. Coral bleaching. เข้าถึงได้จาก http://marinegiscenter.dmcr.go.th/km/coral-blenching/#.WS55qmiGPIV

หรรษา จรรย์แสง. 2542. การจัดการทรัพยากรปะการัง. กรมประมง. 284 หน้า.

Arthur, R., T. J. Done, H. Marsh and V. Harriott. 2006. Local processes strongly influence post-bleaching benthic recovery in the Lakshadweep Island. **Coral Reefs** 25: 427-440.

Baohua, Z., W. Guangce, H. Bo and C. K. Tseng. 2004. Effects of temperature, hypoxia, ammonia and nitrate on the bleaching among three coral species. **Chinese Science Bulletin** 49 (18): 1923-1928.

Buchheim, J. 2016. Coral Reef Bleaching. Odyssey Expeditions-Marine Biology Learning Center Publications. Retrieved from http://www.marinebiology.org/coralbleaching.htm.

Chankong, A. 2014. Biodiversity of inververtebrate in Thailand sea: Corals. Conference 2014 International Day for Biodiversity: Island Biodiversity, June 22-24 2014: Walailak University, Nakhonsithammarat, Thailand.

Finney, D. J. 1952. Probit Analysis (2nd Ed). **Journal of the Institute of Actuaries** 78 (3): 388-390.

Fitt, W. K., F. K. McFarland, M. E. Warner and G. C. Chilcoat. 2000. Seasonal patterns of tossue biomass and densities of symbiotic dinoflagellates in reef corals and relation to coral bleaching. **American Society of Limnology and Oceanography** 45: 667-685.

Hansuebsai, A., S. Rungsupa, P. Chawakitchareon, Y. Kiyoki and S. Sasaki. 2017. Study the effect of Ammonia by Image Analysis on Healthiness Detection for Coral Quality of Life. The

Proceedings of the 27th International Conference on Information Modelling and Knowledge Bases, June 5-9, 2017, Dusit Thani, Krabi, Thailand .746: 354-366.

Kallqvist, T. and A. Svenson. 2013. Assessment of ammonia toxicity in tests with the microalga, Nephroselmis pyriformis, Chlorophyta. Norwegian Institute for Water Research, Kjelsas, Oslo, Norway. **Water Research**. 37(3): 477-484.

Kellogg, C. 2004. Coral Mucus Goes Mainstream-New Discoveries in Microbial Communities. **Journal Marine Ecology Progress Series** 273: 81-88.

Kerswell, P. A. and J. R. Jones. 2003. Effects of hypo-osmosis on the coral Stylophora pistillata: nature and cause of low salinity. **Marine Ecology Progress Series** 253: 145-154.

Lawson, T. B. 1995. Fundamentals of aquaculture engineering. Chapman & Hall, New York. 355 pp.

Lenore, S. C., E. G. Arnold, and D. E. Andrew. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22nd Edition, 10200-Plankton: 1992-2019.

Nozawa, Y. 2012. Annual variation in the timing of coral spawning in a high-latitude environment: influence of temperature. **The Biological Bulletin** 222 (3): 192-202.

Regional Environmental Office 13th . 2016. Reports from the environmental quality situation in Eastern of Thailand at 2015. Regional Environmental Office (Chonburi). 106 p.

Rungsupa, S., P. Chawakitchareon, A. Hansuebsai, S. Sasaki and Y. Kiyoki. 2017. Photographic Assessment of Coral Stress: Effect of Low Salinity to *Acropora sp .Goniopora sp .and Pavona sp.* at Sichang Island, Thailand. The Proceedings of the 27th International Conference on Information Modelling and Knowledge Bases, June 5-9, 2017, Dusit Thani, Krabi, Thailand. 731: 147-158.

Rungsupa, S., W. T. Sesulihatien, A. Hansuebai, P. Chawakitchareon, S. Sasaki and Y. Kiyoki. 2016. The Early Step of Healthiness Detection for Coral Quality of Life at Sichang Island, Thailand. The proceedings of 5th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management, Environmental Engineering Association of Thailand, The Twin Towers Hotel, Bangkok, Thailand, May 11-13, 2016. (11R5-11).

Siebeck, U. E., N. J. Marshall, A. Klü, and O. Hoegh-Guldberg. 2006. Monitoring coral bleaching using a colour reference card. **Coral Reefs** 25 (3): 453-460.

Udomsap, B., S. Rungsupa, P. Chawakitchareon and Y. Kiyoki. 2017. The Effects of Temperature and Ammonia to Coral Health Level: A Case Study of Disc Coral (Turbinaria sp.) at Sichang Island, Thailand. The Proceedings of the 5th International Conference on Engineering, Energy, and Environment, November 1-3, 2017, Arnoma Grand Hotel, Bangkok, Thailand. Envi 05. 6 p.

การศึกษาอิทธิพลของหิ้งแสงต่อปริมาณความส่องสว่างของห้องเรียน กรณีศึกษาอาคารเรียนคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

The Effect of Light Shelf on the Illumination of the Classroom: A Case Study of Faculty of Humanities and Social Sciences Phranakhon Rajabhat University

พรรณวดี โรจนศิริ[1*] นวลวรรณ ทวยเจริญ[1] และ ศิรเดช สุริต[1]

Panwadee Rojanasiri[1*], Nuanwan Tuaycharoen[1] and Siradech Surit[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของหิ้งแสงในองศาต่าง ๆ ต่อการนำแสงธรรมชาติเข้ามายังห้องเรียนอาคารเก่าของมหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นอาคารที่มีอายุเฉลี่ยที่ 40-60 ปี แต่เดิมมีการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคารเรียนน้อย จึงทำให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากในระบบแสงสว่างเพื่อให้เพียงพอต่อการเรียนการสอน การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาห้องเรียนตัวอย่างอาคารเรียนคณะมนุษย์ศาสตร์และสังคมศาสตร์ มีขนาดห้อง 8:00 x 9:00 เมตร ความสูง 3.50 เมตร มีช่องเปิดอยู่ทางด้านตะวันออกเฉียงใต้ และทำการเปลี่ยนชนิดของบานเปิด 3 รูปแบบ คือ หน้าต่างบานไม้ปิดทึบ หน้าต่างบานไม้เปิดกว้าง และหน้าต่างบานกระจก การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการจำลองผลค่าความส่องสว่างและค่าความสม่ำเสมอของแสงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DIALux 4.13 ผลการศึกษาพบว่าบานหน้าต่างไม้แบบเปิดออกสู่ภายนอกร่วมกับหิ้งแสงด้านนอกมุมเอียงที่ 0° และไม่มีหิ้งแสงด้านใน เหมาะสมกับการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในห้องเรียน คณะมนุษย์ศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครมากที่สุด

ABSTRACT

The purpose of this research is to study the effect of various degrees of light shelf on daylighting in a classroom of an old university buildings. The building's age is roughly between 40-60 years. Originally, there is very little daylight penetrating into school buildings. Therefore, this can lead to high energy consumption in lighting system in the building to make spaces effectively for study activities within the classroom. The study was explored an 8:00x9:00x3.50 m classroom with an opening on south-east side. The openings were varied for 3 types, which are closed-wood opening, open-wood opening and glass-opening. This study used lighting simulation software-DIALux 4.13 to explore illuminance and uniformity. The results showed that, for opened-wood opening, light shelf with 0° from the horizontal and no inside member is the most suitable for daylighting in classroom of Faculty of Humanities and Social Sciences, Phranakhon Rajabhat University.

Key Words: classroom, light shelf, daylight

*Corresponding author; e-mail address: panwadee041@hotmail.com

[1]ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

อาคารเรียนในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครประกอบไปด้วยอาคารทั้งสิ้น 57 อาคาร โดยอาคารที่มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 40-60 ปี มีถึง 16 อาคาร เป็นอาคารที่มีเอกลักษณ์ ความสวยงาม มีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ของมหาวิทยาลัย มีการใช้งานในช่วง 08:00 - 16:00 น. แต่เดิมมีการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคารเรียนน้อย จึงทำให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากเพื่อให้เพียงพอต่อการเรียนการสอน ซึ่งห้องเรียนจะมีช่องเปิดบานไม้เพียง 1 ด้าน โดยมีการปิดหน้าต่างเนื่องจากต้องการเปิดเครื่องปรับอากาศ แสงธรรมชาติสามารถเข้ามาในส่วนของช่องแสงด้านบนของหน้าต่างเท่านั้น จึงต้องเปิดไฟตลอดการใช้งานทำให้ปริมาณแสงสว่างไม่เหมาะสมและสูญเสียพลังงานไฟฟ้าอย่างสิ้นเปลือง แนวทางในการแก้ไขปัญหาวิธีหนึ่งคือการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคารเพื่อช่วยเพิ่มแสงสว่างและลดการใช้ไฟฟ้า โดยการออกแบบหิ้งแสงและเปลี่ยนรูปแบบของบานเปิดโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปทรงลักษณ์ของตัวอาคาร เพื่อเป็นการรักษาเอกลักษณ์ดั้งเดิมทางสถาปัตยกรรมที่มีคุณค่าสืบต่อไป

หิ้งแสง (Light shelf) เป็นวิธีการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคารอย่างหนึ่ง ที่สามารถทั้งกันแสงแดดและสะท้อนแสงแดดเข้ามายังอาคารเพื่อลดความร้อนที่มากับแสง โดยการสะท้อนผ่านตัวหิ้งแสงไปยังฝ้าเพดานแล้วจึงสะท้อนลงมาภายในห้อง ในระหว่างการสะท้อนแสงจะลดความร้อนที่มาพร้อมกัน เป็นการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในห้องเรียนโดยมีการกระจายแสงที่ทั่วถึงและลดความร้อนที่มาพร้อมกับแสงซึ่งเหมาะกับอาคารในประเทศไทยเป็นอย่างยิ่ง (ราตรี, 2559)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของหิ้งแสงต่อปริมาณความส่องสว่างของห้องเรียน เพื่อการประหยัดพลังงาน ลดความร้อนจากแสงอาทิตย์ และยังคงเอกลักษณ์ดั้งเดิมทางสถาปัตยกรรมของอาคาร โดยรูปแบบของบานหน้าต่างมี 3 รูปแบบ คือ หน้าต่างบานไม้ปิดทึบเป็นรูปแบบดั้งเดิมของหน้าต่างที่ใช้งานในปัจจุบัน หน้าต่างบานไม้เปิดกว้าง และหน้าต่างบานกระจก และหิ้งแสงยังคงรูปลักษณ์ที่ใกล้เคียงกับรูปแบบเดิมของอาคาร สามารถนำแสงธรรมชาติเข้ามาในห้องเรียนได้อย่างเหมาะสม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับห้องเรียนอื่นๆ ที่มีรูปแบบอาคารที่คลายคลึงกันต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

รายละเอียดกรณีศึกษา

เนื่องจากอาคารที่มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 40-60 ปี มีถึง 16 อาคาร ในการวิจัยนี้จึงเลือกห้องเรียนในอาคารเรียน 2 ชั้น คณะมนุษย์ศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เนื่องจากเป็นอาคารที่มีผู้ใช้งานตลอดในช่วง 08:00 - 16:00 น. รวมถึงเป็นอาคารที่มีขนาดมาตรฐานที่ยังคงอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ที่สุด มีขนาดห้อง 8:00x9:00 เมตร ความสูงถึงท้องฝ้า 3.50 เมตร มีช่องเปิดอยู่ทางด้านตะวันออกเฉียงใต้ พื้นและผนังวัสดุคอนกรีตสีขาว มีค่าการสะท้อนแสง 27% และ 50% พื้นที่ใช้งาน (Working Plane) สูงจากพื้น 0.75 เมตร ตามความสูงของโต๊ะเรียน โดยตำแหน่งกระดานอยู่ในทิศตั้งฉากกับช่องเปิด (Figure 1, 2)

Figure 1 Faculty of Humanities and Social Sciences two-story building

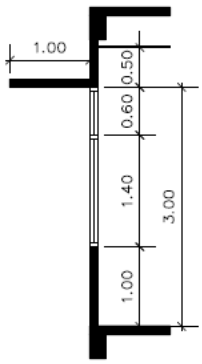


Figure 2 Open section of windows.

การศึกษาจำลองแสงสว่างในห้องเรียน

การศึกษาอิทธิพลของหิ้งแสงต่อปริมาณความส่องสว่างของห้องเรียน โดยการจำลองห้องเรียนเพื่อศึกษาผลของค่าความส่องสว่าง (illuminance) และค่าความสม่ำเสมอของแสง (uniformity) ของแต่ละรูปแบบ เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบโดยใช้โปรแกรม DIALux 4.13

ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1: ทบทวนวรรณกรรมและข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในเรื่อง ทฤษฎีการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในห้องเรียน รูปแบบของหิ้งแสง (light shelf) และติดต่อเจ้าหน้าที่เพื่อขอข้อมูลอาคาร

ขั้นตอนที่ 2: พิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ของหิ้งแสง (light shelf) และบานเปิดที่มีความเหมาะสมกับอาคารเรียน โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบให้น้อยที่สุด โดยต้องคำนึงถึงการอนุรักษ์รูปแบบทางสถาปัตยกรรม ประกอบไปด้วยตัวแปรต้นและตัวแปรตามดังนี้

ตัวแปรต้น

ตัวแปรต้นที่ 1: มุมองศาของหิ้งแสงทั้งภายในและภายนอก 4 รูปแบบ คือ ไม่มีหิ้งแสง, มีหิ้งแสงมุมเอียงที่ 0°, มุมเอียงที่ 30° และมุมเอียงที่ 60° (ปิยะณัฐ, 2559) (Table 1, Figure 4)

ตัวแปรต้นที่ 2: ขนาดของหิ้งแสงภายใน 0.60 เมตร และภายนอก 1:00 เมตร

ตัวแปรต้นที่ 3: ชนิดของบานเปิดหน้าต่าง 3 แบบ คือ บานปิดไม้ (W-C) เป็นรูปแบบดั้งเดิมของหน้าต่างที่ใช้งานในปัจจุบัน, บานเปิดไม้ (W-O) และบานกระจก (G) ทั้ง 3 รูปแบบเป็นหน้าต่างที่สามารถเปลี่ยนรูปแบบจากบานหน้าต่างเดิมได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการเปลี่ยนใหม่ทั้งหมด (Figure 3)

สรุปรูปแบบของหิ้งแสงและบานเปิด ที่นำมาทดสอบทั้ง 48 รูปแบบ ดังนี้

Table 1: Patterns of light shelf and openings used in education.

	Patterns			Inclination of the light shelf	
No.	Wood window (Close)	Wood window (Open)	Glass window	Outside	Inside
1	(W-C)-1[1/]	(W-O)-1[2/]	(G)-1[3/]	-	-
2	(W-C)-2	(W-O)-2	(G)-2	-	0^{o}
3	(W-C)-3	(W-O)-3	(G)-3	-	30^{o}
4	(W-C)-4	(W-O)-4	(G)-4	-	60^{o}
5	(W-C)-5	(W-O)-5	(G)-5	0^{o}	-
6	(W-C)-6	(W-O)-6	(G)-6	0^{o}	0^{o}
7	(W-C)-7	(W-O)-7	(G)-7	0^{o}	30^{o}
8	(W-C)-8	(W-O)-8	(G)-8	0^{o}	60^{o}
9	(W-C)-9	(W-O)-9	(G)-9	30^{o}	-
10	(W-C)-10	(W-O)-10	(G)-10	30^{o}	0^{o}
11	(W-C)-11	(W-O)-11	(G)-11	30^{o}	30^{o}
12	(W-C)-12	(W-O)-12	(G)-12	30^{o}	60^{o}
13	(W-C)-13	(W-O)-13	(G)-13	60^{o}	-
14	(W-C)-14	(W-O)-14	(G)-14	60^{o}	0^{o}
15	(W-C)-15	(W-O)-15	(G)-15	60^{o}	30^{o}
16	(W-C)-16	(W-O)-16	(G)-19	60^{o}	60^{o}

1/ (W-C) = Wood window (Close)

2/ (W-O) = Wood window (Open)

3/ (G) = Glass window

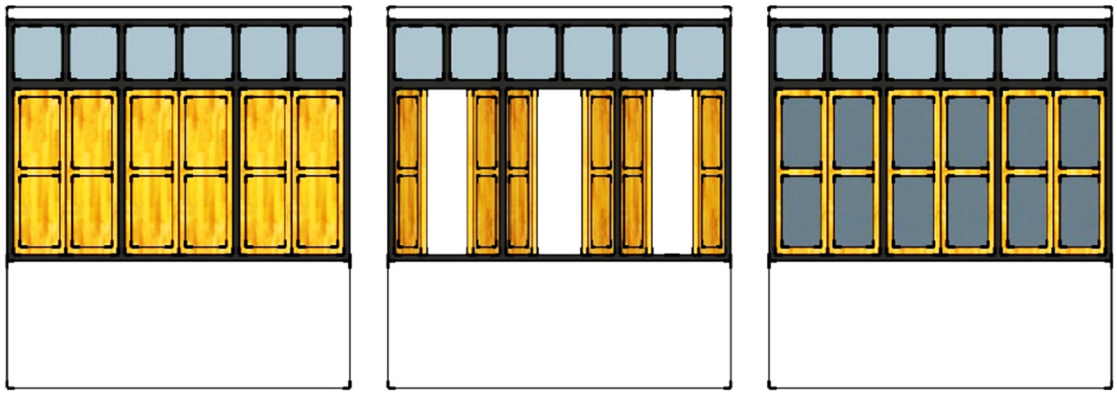


Figure 3 Three types of window: wood window (close), wood window (open) and glass window, respectively.

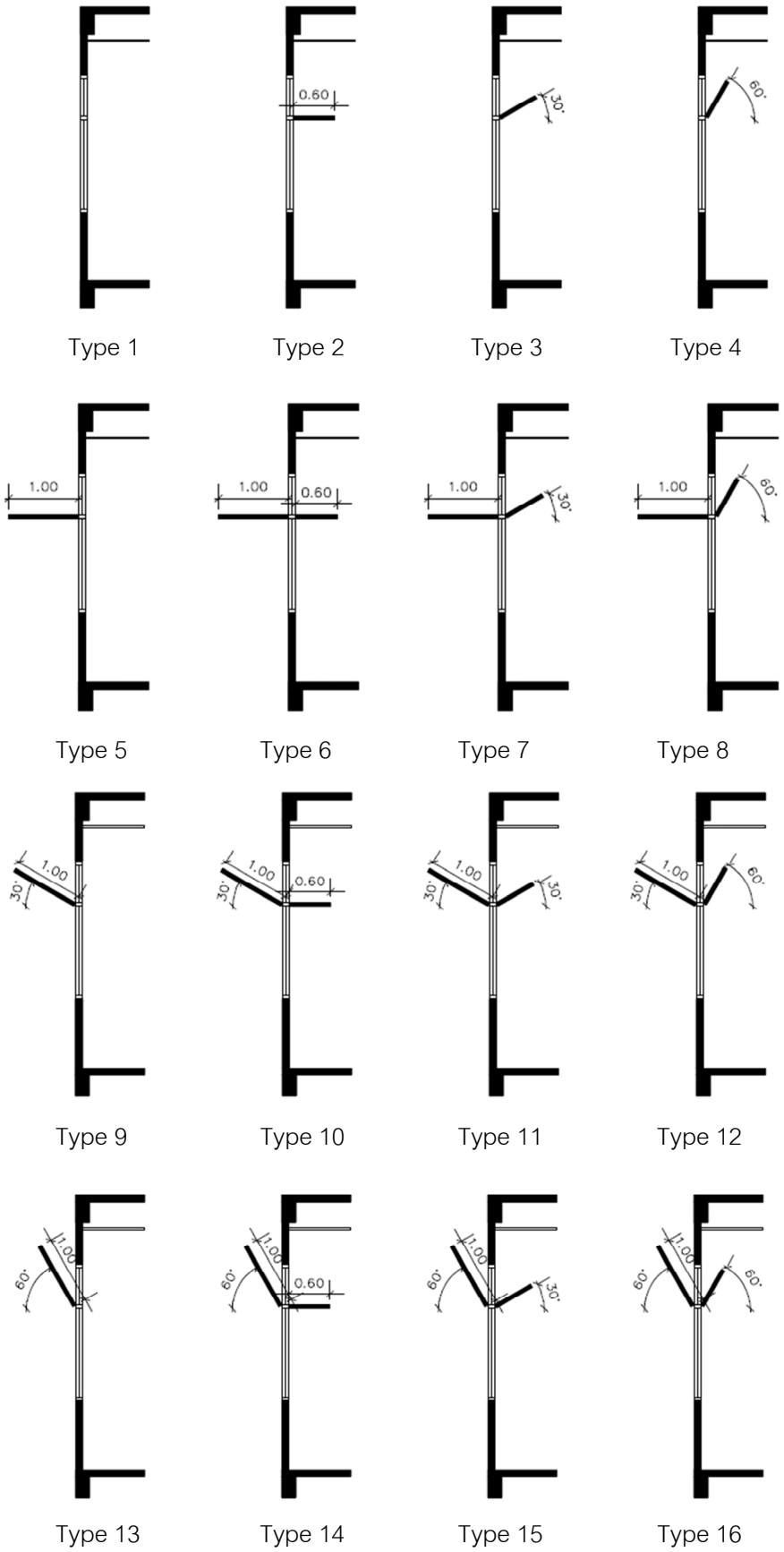


Figure 4 The pattern and size of the light shelf used in the simulation.

ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามที่ 1: ปริมาณค่าความส่องสว่าง (illuminance) ปริมาณของแสงที่ตกกระทบกับพื้นที่ 1 ตารางหน่วยในหนึ่งวินาที ค่าความเหมาะสมของห้องเรียนอยู่ที่ 500 lux (น้ำผึ้ง, 2550)

ตัวแปรตามที่ 2: ค่าความสม่ำเสมอของแสง (uniformity) อัตราส่วนความส่องสว่างต่ำสุดต่อความส่องสว่างเฉลี่ยควรมีความสม่ำเสมอ

ขั้นตอนที่ 3: ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม DIALux 4.13 ทั้ง 48 รูปแบบ โดยกำหนดพื้นที่ทำการศึกษา (working plan) 0.75 เมตรจากพื้นถึงโต๊ะเรียน รูปแบบของท้องฟ้าของประเทศไทยที่พบมากที่สุดคือ ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน (partly cloudy sky) คือท้องฟ้าที่มีเมฆเกินกว่า 3-5 ส่วนของท้องฟ้า โดยจำลอง ณ วันที่ 21 มีนาคม 2560 (vernal equinox), 21 กันยายน 2560 (autumnal equinox), 21 มิถุนายน 2560 (summer) และ 21 ธันวาคม 2560 (winter) โดยจำลอง ณ เวลาการใช้งานอาคารเรียนที่ 08:00 - 16:00 น. ทุก ๆ 2 ชั่วโมง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย (ปิยะณัฐ, 2559)

ขั้นตอนที่ 4: นำผลที่ได้จาการทดลองขั้นที่ 3 มาสรุปรูปแบบของหิ้งแสง (light shelf) ที่มีความเหมาะสมที่สุดต่ออาคารเรียนคณะมนุษย์ศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาวิจัยห้องเรียนของอาคารเรียนคณะมนุษย์ศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร ด้วยโปรแกรม DIALux 4.13

Chart 1 แสดงค่าความส่องสว่างเฉลี่ยตลอดทั้งปี (lux) ของหน้าต่างบานไม้ปิด (W-C), บานไม้เปิด (W-O), บานกระจก (G) และหิ้งแสง 16 รูปแบบ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าหิ้งแสงรูปแบบที่ 13 (หิ้งแสงด้านนอกมุมเอียงที่ 60° และไม่มีหิ้งแสงด้านใน) ของบานไม้เปิด (W-O) ก่อให้เกิดค่าความส่องสว่างเฉลี่ยสูงที่สุด (2,583.7 lux) และ หิ้งแสงรูปแบบที่ 1 รูปแบบเดิมของหน้าต่าง (ไม่มีหิ้งแสงทั้งด้านนอกและด้านใน) ของหน้าต่างบานไม้ปิด (W-C) ก่อให้เกิดผลค่าส่องสว่างต่ำที่สุด (1,250.2 lux)

Chart 1 The average annual illuminance (lux) of three windows.

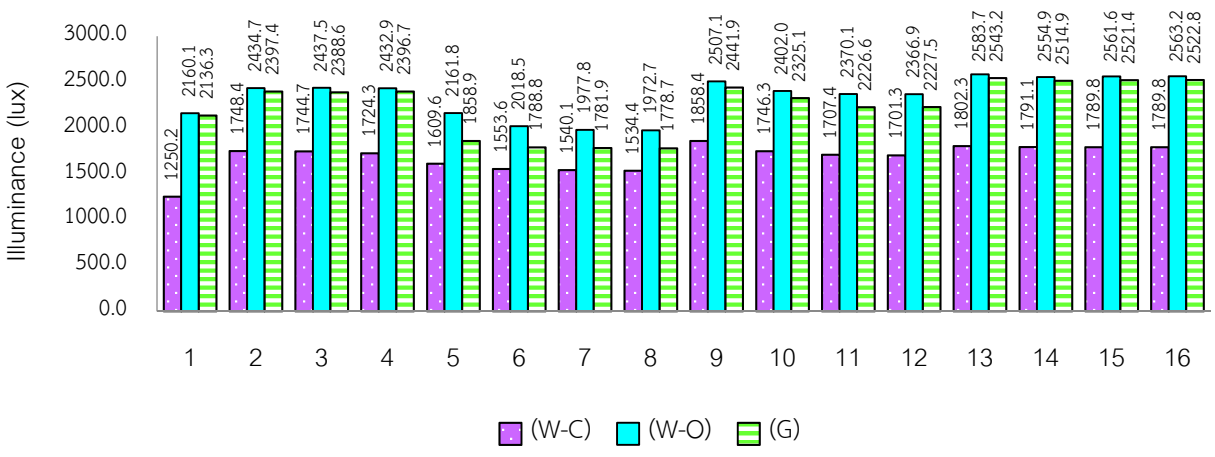
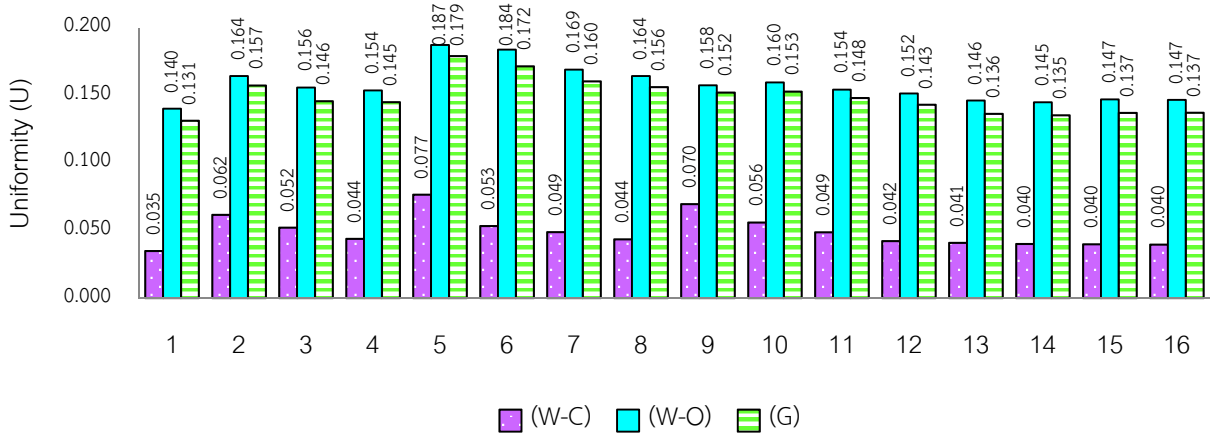


Chart 2 แสดงค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปี (U) ของหน้าต่างบานไม้ปิด (W-C), บานไม้เปิด (W-O), บานกระจก (G) และหิ้งแสง 16 รูปแบบ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าหิ้งแสงรูปแบบที่ 5 (หิ้งแสงด้านนอกมุมเอียงที่ 0° และไม่มีหิ้งแสงด้านใน) ของบานไม้เปิด (W-O) ก่อให้เกิดค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยสูงที่สุด (0.187) และหิ้งแสงรูปแบบที่ 1 รูปแบบเดิมของหน้าต่าง (ไม่มีหิ้งแสงทั้งด้านนอกและด้านใน) ของหน้าต่างบานไม้ปิด (W-C) ก่อให้เกิดผลค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยต่ำที่สุด (0.035)

Chart 2 The average annual uniformity (U) of three windows.



สรุป

วัตถุประสงค์ของโครงการคือการศึกษาอิทธิพลของหิ้งแสงเพื่อการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในห้องเรียนอย่างเหมาะสม คณะมนุษย์ศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร โดยรูปแบบของบานเปิดและหิ้งแสง (Light shelf) ทั้ง 48 รูปแบบก่อให้เกิดค่าความส่องสว่าง (illuminance) เฉลี่ยตลอดทั้งปีเกิน 500 lux ทั้งสิ้น การศึกษาในครั้งนี้จึงใช้การพิจารณาที่ค่าความสม่ำเสมอของแสง (uniformity) เป็นเกณฑ์ ผลการศึกษาพบว่าบานไม้เปิด (W-O) รูปแบบที่ 5 (หิ้งแสงด้านนอกมุมเอียงที่ 0° และไม่มีหิ้งแสงด้านใน) มีค่าความสม่ำเสมอของแสงเหมาะสมที่สุด 0.187 มากกว่ารูปแบบดั้งเดิมของอาคาร คือรูปแบบที่ 1 (ไม่มีหิ้งแสงทั้งด้านนอกและด้านใน) ของหน้าต่างบานไม้ปิด (W-C) ที่มีค่าความสม่ำเสมอของแสง 0.035 สามารถช่วยนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในห้องเรียนเพื่อการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นวลวรรณ ทวยเจริญ และ อ.ดร.ศิรเดช สุริต ผู้ให้คำปรึกษาต่างๆ และแบ่งปันประสบการณ์ความรู้ตั้งแต่เริ่มต้นโครงการ และขอขอบพระคุณครอบครัว สมาชิก MBIT ทุกคนรวมถึงผู้เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

น้ำฝึ้ง สายหงส์. 2550. **แนวทางการออกแบบแสงสว่างในห้องเรียนสื่อผสม**, ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ปิยะณัฐ กิตติลักขณา. 2559. **การพัฒนาแผงกันแดดกระจกแบบแผ่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แสงธรรมชาติภายในห้องเรียนระดับมหาวิทยาลัย**, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ราตรี แก่นจันทร์. 2559. ก**ารพัฒนารูปแบบหิ้งแสงโค้งเพื่อการใช้แสงธรรมชาติสำหรับห้องเรียนในโรงเรียนอนุบาล**, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

การจำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกนิรภัยแบบเต็มใบเปิดหน้าสำหรับผู้ใช้รถจักรยานยนต์บริเวณด้านหน้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Simulation of an Impact Test of an Open Face Motorcycle Helmet at the Frontal Area by Finite Element Method

ฐาปน์กร ไชยคำภา[1] และ เอกชัย ชัยชนะศิริ[1*]

Tapakorn Chaikumpa[1] and Ekachai chaichanasiri[1*]

บทคัดย่อ

อุปกรณ์หลักที่ช่วยลดการบาดเจ็บที่ศีรษะเมื่อเกิดอุบัติเหตุในการขับขี่รถจักรยานยนต์คือหมวกนิรภัย การออกแบบหมวกนิรภัยในประเทศไทยจะอาศัยการลองผิดลองถูกโดยการนำต้นแบบหมวกนิรภัยไปทดสอบการกระแทก ถ้าต้นแบบไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบการกระแทกก็จะต้องแก้ไขต้นแบบใหม่ซึ่งสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้จำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกนิรภัยเพื่อลดการลองผิดลองถูกในการออกแบบหมวกนิรภัย งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกนิรภัยแบบเต็มใบเปิดหน้าสำหรับผู้ใช้รถจักรยานยนต์ที่บริเวณด้านหน้าของหมวกนิรภัย และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการทดสอบการกระแทกจริงกับการจำลอง จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นในศีรษะทดสอบซึ่งได้จากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกับผลการทดสอบจริง 5.95 % ดังนั้นการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาจำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกนิรภัยสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางขั้นต้นในการออกแบบหมวกนิรภัยได้ซึ่งจะช่วยลดการลองผิดลองถูกลงได้

ABSTRACT

The main equipment to reduce head injuries during motorcycle accidents is a helmet. In Thailand, helmets are designed by trial and error. The prototype helmet is taken to perform an impact test. If the prototype cannot pass impact test criteria, the prototype must be modified that waste time and money. This research presents the use of the finite element method (FEM) to simulate the impact test of the helmet to reduce trial and error in designing the helmet. In this research, an impact test at the frontal area of an open face motorcycle helmet was simulated and compared with the actual impact test. It was found that the peak acceleration during impact in the headform simulated by FEM had a difference from the actual impact test 5.95 %. Therefore, the simulation of an impact test by FEM can be used as a basic guideline in designing the helmet that can reduce trial and error.

Key Words: impact test, helmet, finite element method

*Corresponding author; e-mail address: **ekachai.cha@mahidol.ac.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม 73170

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Nakhonpathom 73170

คำนำ

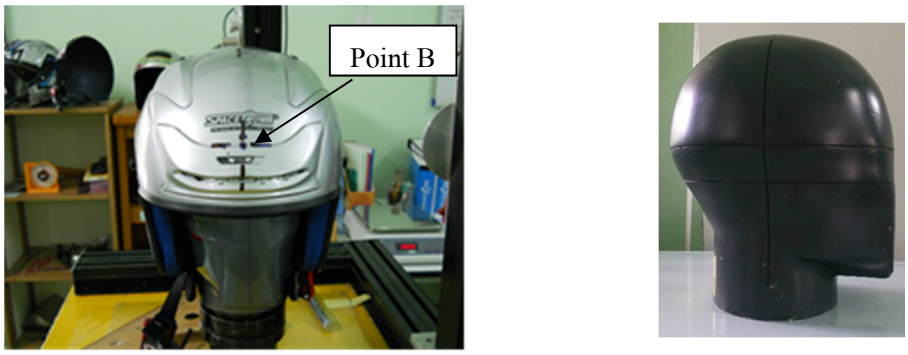
อุปกรณ์หลักที่ช่วยลดการบาดเจ็บที่ศีรษะเมื่อเกิดอุบัติเหตุในการขับขี่รถจักยานยนต์ก็คือหมวกนิรภัย (ศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน [ศวปถ.]และ มูลนิธิสาธารณสุขแห่งชาติ [มสช.], 2557) ปัจจุบันการออกแบบหมวกนิรภัยของโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยอาศัยการลองผิดลองถูกโดยการนำต้นแบบหมวกนิรภัยไปทดสอบการกระแทก การทดสอบการกระแทกของหมวกนิรภัยในประเทศไทยจะอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 369-2557 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558) ถ้าต้นแบบไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบการกระแทกก็จะต้องแก้ไขต้นแบบหมวกนิรภัยใหม่ ซึ่งสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการนำวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์มาจำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกนิรภัย เพื่อลดการลองผิดลองถูกในการออกแบบหมวกนิรภัย โดยทำการจำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกนิรภัยแบบเต็มใบเปิดหน้าสำหรับผู้ใช้รถจักรยานยนต์ที่บริเวณด้านหน้าของหมวกนิรภัยและเปรียบเทียบกับการทดสอบจริงซึ่งทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก.369-2557 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558).

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดสอบการกระแทก

งานวิจัยนี้ใช้หมวกนิรภัยแบบเต็มใบเปิดหน้าสำหรับผู้ใช้รถจักรยานยนต์ยี่ห้อ Space Crown รุ่น Phoenix-D (Figure 1(a)) หมวกนิรภัยถูกนำมาทดสอบการกระแทกที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางด้านหน้าของหมวกนิรภัย (จุด B) อ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 369-2557 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558) เนื่องจากเป็นจุดที่เกิดการกระแทกบ่อยเมื่อเกิดอุบัติเหตุ การทดสอบเริ่มจากการนำหมวกนิรภัยมากำหนดจุดทดสอบดัง Figure 1(a) จากนั้นสวมหมวกนิรภัยเข้ากับศีรษะทดสอบ (Headform) ใน Figure 1(b) และนำไปติดตั้งบนเครื่องทดสอบการกระแทก เครื่องที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องยี่ห้อ Cadex รุ่น 1000_00_MIMAT ดังแสดงใน Figure 2 เครื่องทดสอบจะยกหมวกนิรภัยพร้อมศีรษะทดสอบขึ้นไปที่ความสูงซึ่งเมื่อปล่อยให้ตกลงมากระแทกกับทั่งกระแทกด้านล่างจะมีความเร็วในการกระแทกอยู่ที่ 7.5 เมตร / วินาที ทั่งกระแทกที่ใช้เป็นแบบแบนราบ (Flat anvil) ซึ่งแทนรูปร่างส่วนใหญ่ของวัตถุที่หมวกนิรภัยจะไปกระแทกเมื่อเกิดอุบัติเหตุ (Fernandes, et al., 2013) เครื่องทดสอบจะทำการบันทึกค่าความเร่งที่จุดศูนย์ถ่วงในศีรษะทดสอบขณะที่เกิดการกระแทกเพื่อที่จะแสดงค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นและทำการสร้างกราฟความเร่งต่อเวลา



(a) (b)

Figure 1 (a) Motorcycle helmet used in this research (b) headform

Figure 2 Impact testing machine

สมบัติทางกลของวัสดุ

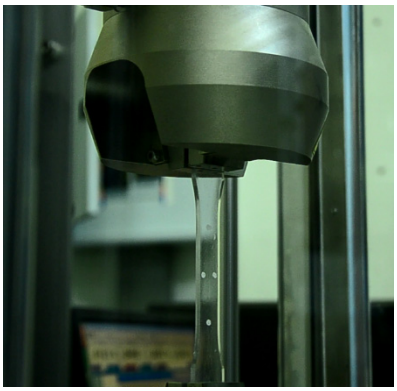
วัสดุที่ใช้ในการผลิตหมวกนิรภัยจะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติทางกลสำหรับใช้ในการจำลองการทดสอบการกระแทกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยสมมุติให้วัสดุมีสมบัติทางกลแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) (Fernandes and Alves, De Sousa, 2013) โดยค่าที่ต้องการคือ ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) และอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

1.เปลือกหมวกและแผ่นบังลม

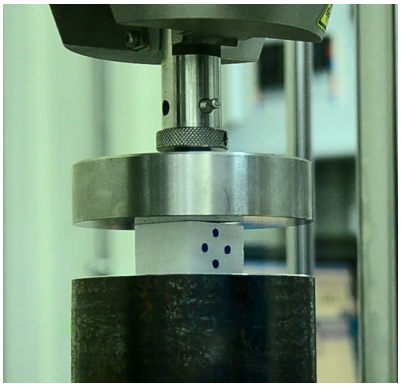
วัสดุที่ใช้ทำเปลือกหมวกผลิตจากพลาสติก ABS และแผ่นบังลมผลิตจากโพลีคาร์บอนเนต (PC) การทดสอบสมบัติทางกลใช้การขึ้นรูปชิ้นงานและทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-10 (ASTM International, 2010) ทำการทดสอบด้วยการดึงโดยใช้เครื่องทดสอบยี่ห้อ Instron รุ่น 8872 ตาม Figure 3(a) และได้ผลการทดสอบตาม Table 1

2.โฟมรองใน

โฟมรองผลิตจากโฟมชนิด EPS การทดสอบสมบัติทางกลใช้การตัดชิ้นงานเป็นก้อนสี่เหลี่ยมขนาด 3 x 3 x 2 เซนติเมตร จากโฟมรองในของหมวกนิรภัยจริงแล้วนำไปทำการทดสอบด้วยวิธีการกดตาม Figure 3(b) และได้ผลการทดสอบตาม Table 1 โดยใช้เครื่องทดสอบการกดยี่ห้อ Instron รุ่น 8872



(a)



(b)

Figure 3 (a) Tension testing (b) compression testing

Table 1 Mechanical properties of the materials

Material	Yield stress (MPa)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
ABS	34.840	1,873.700	0.38061
PC	56.563	2,090.967	0.46621
EPS	0.348	9.244	0.09355

การจำลองการทดสอบการกระแทกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองการทดสอบการกระแทกเริ่มต้นจากการนำแบบจำลอง 3 มิติของชิ้นส่วนหมวกนิรภัย ศีรษะทดสอบ และทั่งกระแทกใน Figure 4 มาจัดเรียงตามตำแหน่งการทดสอบ ดังแสดงใน Figure 5 ต่อมาดำเนินการสร้างเมชด้วยโปรแกรม MSC. Patran ดังแสดงใน Figure 6 ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้คือเอลิเมนต์ 4 เหลี่ยมแบบ 4 โหนด (4-node quadrilateral) และแบบพิรามิดฐานสามเหลี่ยมแบบ 4 โหนด (4-node tetrahedral) โดยมีจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ตาม Table 2

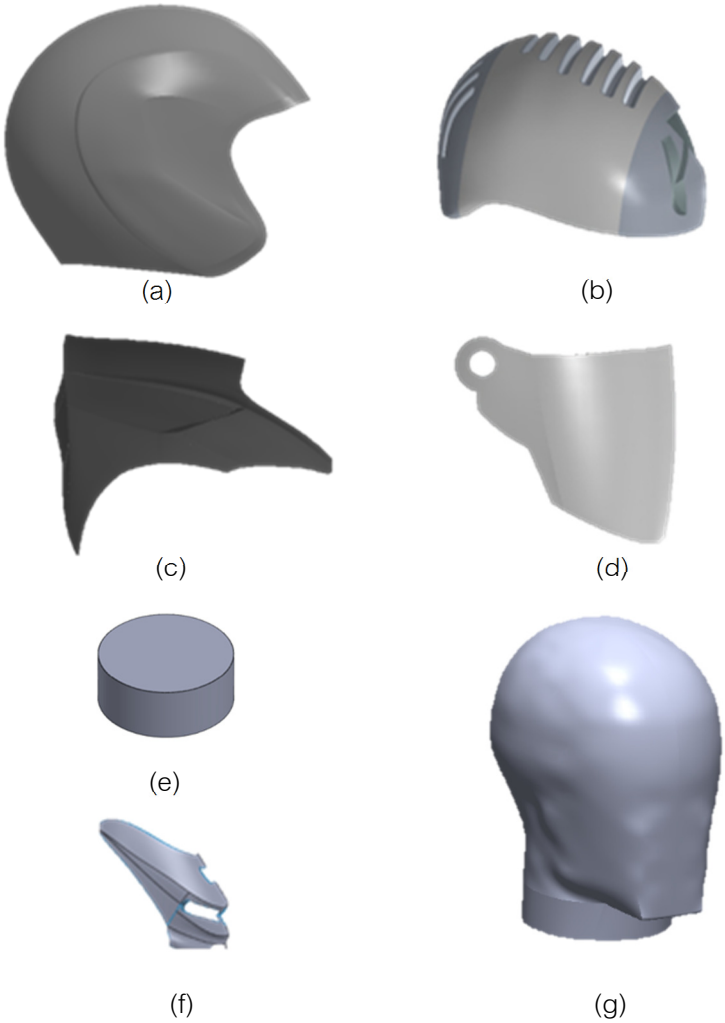


Figure 4 3D CAD models of (a) shell (b) foam liner (c) spoiler (d) visor (e) flat anvil (f) forehead vent (g) headform

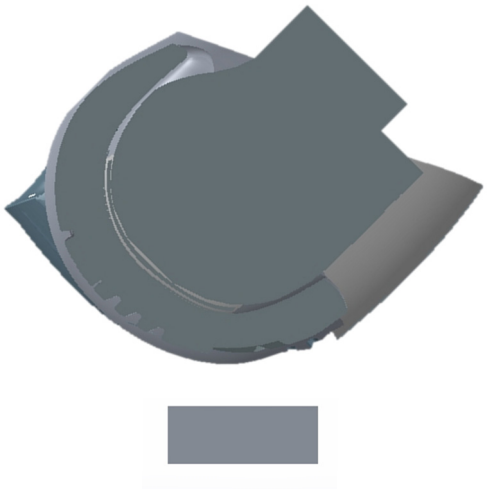


Figure 5 3D CAD model of the helmet for frontal impact

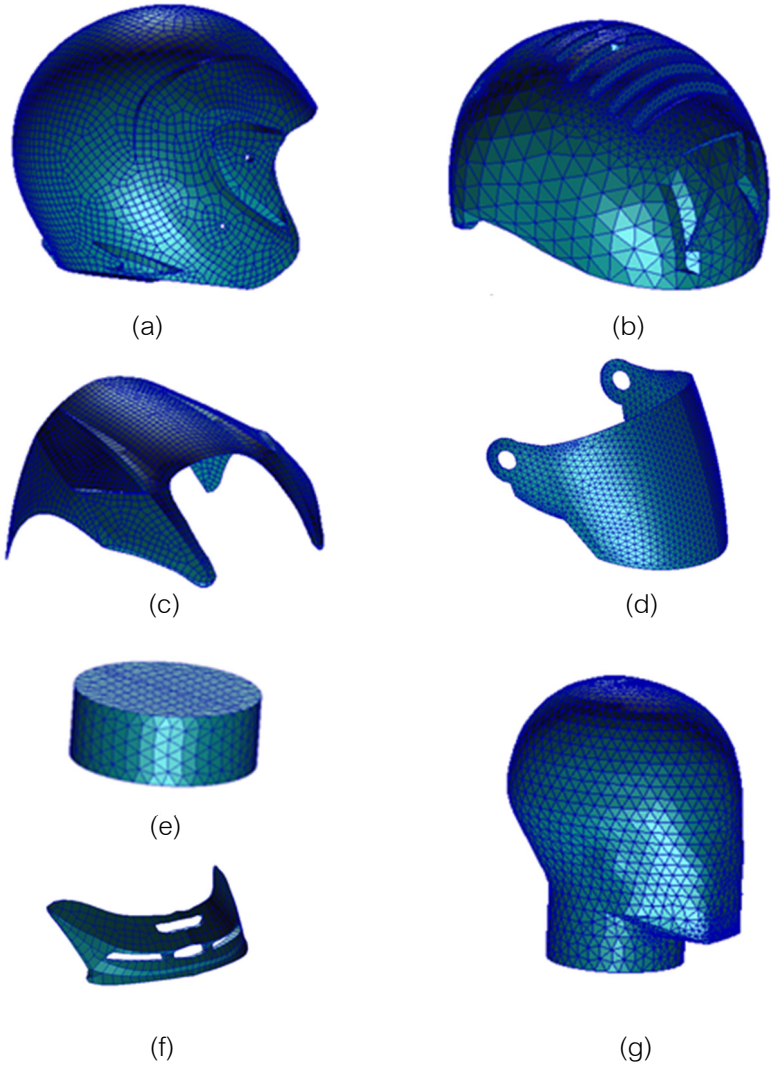
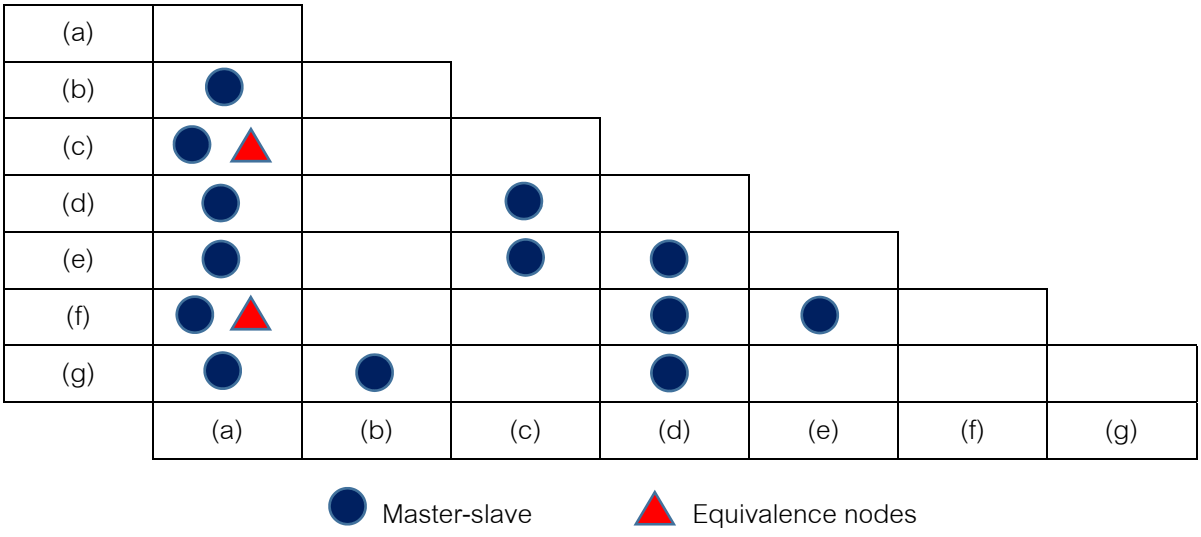


Figure 6 Finite element models of (a) shell (b) foam liner (c) spoiler (d) visor (e) flat anvil (f) forehead vent (g) headform

Table 2 Number of elements and nodes of each part

Part	Element Type	Number of elements	Number of nodes
Shell	4-node quadrilateral	3,994	3,966
Foam liner	4-node tetrahedral	46,322	9,859
Spoiler	4-node quadrilateral	3,345	2,386
Visor	4-node tetrahedral	8,820	3,170
Headform	4-node tetrahedral	7,443	1,904
Flat anvil	4-node tetrahedral	896	282
Forehead vent	4-node quadrilateral	452	499

ค่าสมบัติทางกลของเปลือกหมวก (Shell, spoiler, forehead vent) แผ่นบังลม (Visor)และโฟมรองใน (Foam liner) นำมาจาก Table 1 และสมมุติให้มีพฤติกรรมแบบ Elastic perfectly plastic ในส่วนของศีรษะทดสอบทำมาจากแมกนีเซียมอัลลอยด์ และทั่งกระแทกทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ซึ่งในการทดสอบการกระแทกจะมีการยุบตัวน้อยมากเมื่อเทียบกับเปลือกหมวก แผ่นบังลมและโฟมรองใน ดังนั้นในการจำลองการทดสอบการกระแทกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงสมมุติให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) (Aiello *et al.*, 2007) การประกอบชิ้นส่วนใน Figure 6 จะเริ่มจากชิ้นส่วนศีรษะทดสอบเป็นชิ้นตั้งต้นก่อนที่จะนำชิ้นส่วนโฟมรองในมาประกอบตามด้วยชิ้นส่วนเปลือกหมวกและชิ้นส่วนสุดท้ายคือทั่งกระแทก โดยการกำหนดค่าเงื่อนไขการสัมผัส (Contact condition) ของแต่ละชิ้นส่วนจะกำหนดให้บริเวณที่สัมผัสกันเป็นแบบ Master-slave และบริเวณที่ต้องการเชื่อมให้ติดกันจะใช้การยุบรวมโหนด (Equivalence nodes) ดังแสดงใน Figure 7 ในการจำลองการทดสอบการกระแทกนั้นจะใช้โปรแกรม MSC. Dytran โดยกำหนดให้ทั่งกระแทกอยู่กับที่และให้หมวกนิรภัยและศีรษะทดสอบเคลื่อนที่ลงมากระแทกกับทั่งกระแทกเช่นเดียวกับการทดสอบจริง ดังแสดงใน Figure 8 และโปรแกรมจะคำนวณหาค่าความเร่งในศีรษะทดสอบที่จุดศูนย์ถ่วงเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง



(a) Shell (b) foam liner (c) spoiler (d) visor (e) flat anvil (f) forehead vent (g) headform

Figure 7 Contact condition of each part

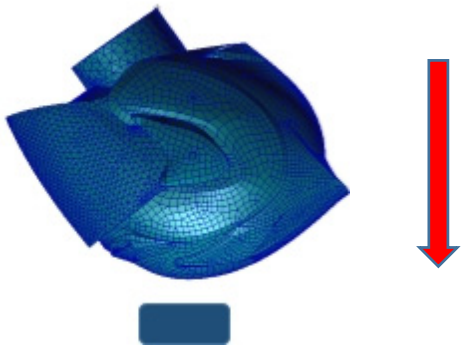


Figure 8 Arrangement of finite element models for an impact test simulation

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดสอบการกระแทกด้วยวิธีการทดสอบจริงและจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ผลเป็นกราฟความเร่งต่อเวลาที่เกิดขึ้นภายในศีรษะทดสอบที่จุดศูนย์ถ่วง มีลักษณะดัง Figure 9 โดยจากผลของการทดสอบจริง (Experiment) พบว่าค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเท่ากับ 218.3 g โดยค่า g คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก และผลจากการจำลองการทดสอบ (FEM) ได้ความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเท่ากับ 205.315 g ดัง Figure 9 ซึ่งมีความแตกต่างของค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบจริงกับการจำลองการทดสอบอยู่ที่ 5.95% และพบว่าลักษณะกราฟความเร่งต่อเวลาที่เกิดขึ้นจากการจำลองมีรูปร่างสอดคล้องกับการทดสอบจริง เมื่อพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในหมวกนิรภัยพบว่าความเค้นสูงสุดที่ช่วงเวลาเดียวกันกับที่เกิดความเร่งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 34.84 MPa ที่ ด้านหน้าของหมวกนิรภัยซึ่งสอดคล้องกับบริเวณที่เกิดการกระแทกตาม Figure 10

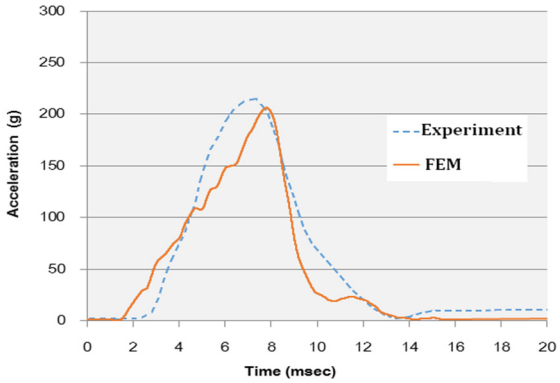


Figure 9 Comparison of acceleration – time curve between experiment and FEM

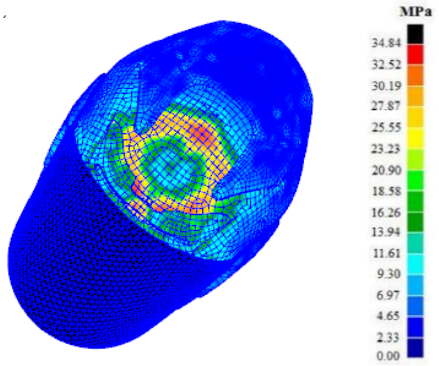


Figure 10 Stress distribution during the peak acceleration

สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการจำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกนิรภัยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่บริเวณด้านหน้าของหมวกนิรภัยและทำการเปรียบเทียบค่าความเร่งในศีรษะทดสอบจากการจำลองกับผลการทดสอบจริงซึ่งมีค่าความแตกต่างอยู่ที่ 5.95% กราฟความเร่งต่อเวลาที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกันรวมทั้งตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดมีความสอดคล้องกับตำแหน่งที่เกิดการกระแทก ดังนั้นการจำลองการทดสอบการกระแทกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำมาเป็นแนวทางข้างต้นในการออกแบบหมวกนิรภัยซึ่งจะช่วยลดการลองผิดลองถูกได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด ย่งเซ่งฮง อุตสาหกรรม ที่ให้การสนับสนุนหมวกนิรภัยสำหรับใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบวัสดุ

เอกสารอ้างอิง

ศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน [ศวปถ.]และ มูลนิธิสาธารณสุขแห่งชาติ [มสช.]. 2557.**หมวกนิรภัย คู่มือความปลอดภัยบนท้องถนนสำหรับผู้กำหนดนโยบายและผู้ปฏิบัติ**.แหล่งที่มา http://resource.thaihealth.or.th/library/hot/13847, 20 มกราคม 2557.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2558.**หมวกนิรภัยสำหรับผู้ใช้รถจักรยามยนต์**. มอก. 369-2557.

Aiello, M., Galvanetto, U.and L. Iannucci, 2007. Numerical simulations of motorcycle helmet impact tests. **International Journal of Crashworthiness** 12: 1-7.

ASTM International. 2010. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. ASTM D638-10.

Fernandes, F.A., Alves de Sousa, R.J., Willinger,R., and C. Deck. 2013. Finite Element Analysis of Helmeted Impacts and Head Injury Evaluation with a Commercial Road Helmet, **IRCOBI Conference** 2013.

Fernandes, F.A.O. and R.J. Alves, De Sousa. 2013. Motorcycle helmets - A state of the art review. **Accident Analysis and Prevention** 56:1-21.

การตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากคาร์บอเนชันของทางพิเศษ

Inspection of Expressway Reinforce Concrete Structures Deteriorated by Carbonation

ประภากร สำราญกิจ[1*] และ วันชัย ยอดสุดใจ[2]

Prapakorn Samrankij[1*] and Wanchai Yodsudjai[2]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากคาร์บอเนชันของทางพิเศษ โดยทำการตรวจพินิจ ทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต ตรวจสอบค่าความลึกของระยะคาร์บอเนชัน ตรวจสอบค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ประเมินระดับความรุนแรงของสภาวะแวดล้อมคาร์บอเนชัน จากการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ นำค่าที่ได้มาคำนวณตามมาตรฐาน มยผ.1332 – 50 นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ตามหลักสถิติเพื่อหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโครงสร้าง เนื่องจากคาร์บอเนชันเปรียบเทียบกับอายุโครงสร้าง พื้นที่ที่ทำการทดสอบมี 3 สายทาง คือ ทางด่วนเฉลิมมหานคร ทางพิเศษฉลองรัช และทางพิเศษบูรพาวิถี โดยจะทำการทดสอบโครงสร้าง 2 ส่วน คือ เสาตอม่อและกำแพงกันตก การศึกษาพบว่าทางพิเศษที่มีอายุโครงสร้างมากกว่ามีค่าความลึกของระยะคาร์บอเนชันมากกว่า และกำแพงกันตกมีค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโครงสร้าง เนื่องจากคาร์บอเนชันมากกว่าเสาตอม่อ

ABSTRACT

This research was conducted to study on Inspection of Expressway Reinforce Concrete Structures Deteriorated by Carbonation by performing visual test, test for compressive strength, inspection of carbonation depth, concrete covering inspection, and evaluation on severity of carbonation environment. The values obtained from inspecting intensity of carbon Dioxide and relative humidity were calculated based on Concrete Standard 1332 - 50. Obtained data were analyzed under the statistical principles in order to find the mean of structure's rusting because carbonation was compared with useful life of structure. There were 3 expressways used in this test including Chaloem Maha Nakhon Expressway, Chalong Rat Expressway, and Burapa Bithi Expressway. There were 2 parts of structure that would be tested including piers and parapet. The results showed that there was deeper carbonation in older expressways than younger ones and parapets faced greater risk of steel corrosion due carbonation than piers.

Key Words: Inspection, Expressway, Carbonation

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

[1]สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Infrastructure Engineering and Management, Faculty of Engineerig, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

เนื่องจากทางพิเศษสายแรกของประเทศไทยมีอายุการใช้งานมานานกว่า 30 ปี ณ ปัจจุบันได้มีการตรวจสอบพบความเสียหายของโครงสร้าง เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตและเกิดการหลุดร่อนของพื้นผิวคอนกรีตในหลายพื้นที่ตามปกติเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะสามารถป้องกันการเกิดสนิม จากคุณสมบัติความเป็นด่างของคอนกรีตที่หุ้มอยู่โดยรอบ แต่สถานะภาพความเป็นด่างของคอนกรีตจะถูกทำลายด้วยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเนื้อคอนกรีต เกิดกระบวนการคาร์บอเนชันในคอนกรีตและเมื่อปฏิกิริยาเข้าถึงผิวเหล็กเสริมจะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้หากมีน้ำและก๊าซออกซิเจนอย่างเพียงพอ สนิมในเหล็กเสริมจะส่งผลให้กำลังของโครงสร้างลดลง เพราะหน้าตัดของเหล็กเสริมจะลดลง แต่เหล็กเสริมที่เป็นสนิมจะมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้นเกิดแรงดันทำให้คอนกรีตปริแตก และเมื่อถึงสภาวะดังกล่าว อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากผิวเหล็กจะสัมผัสกับอากาศ และความชื้นโดยตรงเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อการใช้งาน จึงจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาโครงสร้างอย่างถูกต้องเหมาะสม สามารถยืดอายุการใช้งานและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในระยะยาวได้

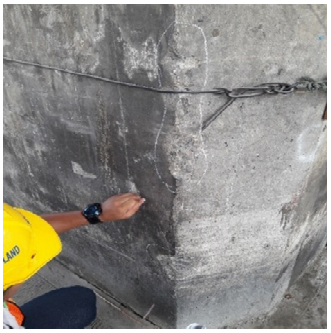
การตรวจสอบสนิมในโครงสร้างคอนกรีตอาจทำโดยตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) เพื่อตรวจสอบรอยร้าวหรือการกะเทาะของคอนกรีตที่ผิวหน้าเนื่องจากการเกิดสนิมเหล็ก หรืออาจทำการตรวจสอบละเอียดมากขึ้น โดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย หรือกึ่งทำลาย การเลือกเครื่องมือทดสอบผู้ใช้จำเป็นต้องมีความรู้ถึงแนวทางการนำไปใช้ และข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ เพื่อที่จะนำข้อมูลมาใช้ในการประเมินผลให้แม่นยำขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำเสนอข้อมูลการตรวจสอบโครงสร้างทางพิเศษคอนกรีตเสริมเหล็กในทางพิเศษ จำนวน 3 สายทาง คือ ทางด่วนเฉลิมมหานคร ทางพิเศษฉลองรัช และทางพิเศษบูรพาวิถี โดยมีมาตรฐานการออกแบบและควบคุมที่ใกล้เคียงกัน โดยตรวจสอบทางพิเศษที่มีอายุการใช้งานในช่วง 19 – 36 ปี

อุปกรณ์และวิธีการ

การตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากคาร์บอเนชันของทางพิเศษนี้เป็นการตรวจสอบที่บริเวณเสาตอม่อ และกำแพงกันตก ประกอบด้วยการตรวจพินิจความเสียหายในเบื้องต้นพร้อมกับการทดสอบแบบไม่ทำลาย เช่น การทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) การตรวจสอบค่าความลึกของระยะคาร์บอเนชัน (Carbonation Depth) การตรวจสอบค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (Cover Depth) การตรวจวัดสภาพแวดล้อมของบริเวณที่ทำการทดสอบ โดยวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน

การตรวจพินิจ

การตรวจพินิจ (Visual Inspection) หมายถึง การตรวจสอบด้วยตาเปล่า ร่วมกับอุปกรณ์การตรวจสอบพื้นฐาน เช่น ไม้บรรทัด มาตรวัดความกว้างรอยร้าว หรือกล้องบันทึกภาพ โดยไม่ใช้อุปกรณ์การตรวจสอบทางอิเล็กทรอนิกส์มาเกี่ยวข้องในการตรวจวัดความเสียหาย (รูปที่ 1)

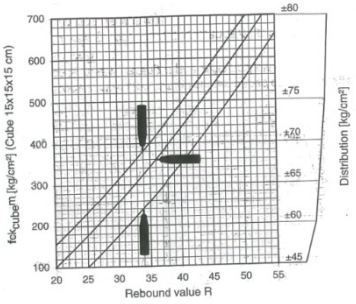


รูปที่ 1 การตรวจพินิจ

การทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต

การทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) โดยการใช้ค้อนกระแทก ตาม มยผ.1501 (2551) พื้นที่ที่จะทำการทดสอบมี 3 สายทาง คือ ทางด่วนเฉลิมมหานคร (36 ปี) ทางพิเศษฉลองรัช (21 ปี) และทางพิเศษบูรพาวิถี (19 ปี) ทำการทดสอบทั้งหมด 10 บริเวณ เป็นทางด่วนเฉลิมมหานคร 6 บริเวณ ทางพิเศษฉลองรัช 2 บริเวณ และทางพิเศษบูรพาวิถี 2 บริเวณ แต่ละบริเวณจะทำการทดสอบ 3 ชุดการทดสอบ ในแต่ละชุดการทดสอบมีการทดสอบจำนวน 10 จุด ซึ่งจะทำการทดสอบโครงสร้าง 2 ส่วน คือ เสาตอม่อ และกำแพงกันตก โดยค้อนกระแทกกดที่ผิวคอนกรีตในลักษณะตั้งฉากกับผิวคอนกรีตแล้วกดกระแทกให้เครื่องสะท้อนค่าการกด (Rebound Number) (รูปที่ 2) นำค่าการสะท้อนที่ได้แปลงเป็นกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนและกำลังอัด (รูปที่ 3)

รูปที่ 2 การทดสอบค่ากำลังอัดคอนกรีต



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนและกำลังอัด

การตรวจสอบค่าความลึกของระยะคาร์บอเนชัน

การตรวจสอบค่าความลึกของระยะคาร์บอเนชัน (Carbonation Depth) เป็นการตรวจสอบโดยการใช้น้ำยาฟินอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ฉีดลงบนตัวอย่างคอนกรีต (RILEM Committee TC56 , 1998) หากคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสีชมพูม่วงแสดงว่าคอนกรีตไม่เกิดคาร์บอเนชัน แต่ถ้าคอนกรีตไม่เปลี่ยนสีแสดงว่าเกิดคาร์บอเนชัน พื้นที่ที่ทำการทดสอบจะเป็นพื้นที่เดียวกับการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต แต่จะทำการทดสอบบริเวณละ 5 จุด โดยใช้สว่านเจาะตั้งฉากกับผิวคอนกรีต ใช้กระดาษ A4 ที่ได้ฉีดพ่นสารละลายฟินอล์ฟทาลีนจนเปียกชุ่มรับผงคอนกรีต (รูปที่ 4) สังเกตการณ์เปลี่ยนสีของสารละลายฟินอล์ฟทาลีนกับผงคอนกรีต หากเปลี่ยนเป็นสีชมพูม่วงแสดงว่าถึงจุดสิ้นสุดระยะคาร์บอเนชันแล้วทำการวัดระยะค่าความลึกคาร์บอเนชัน (รูปที่ 5)

รูปที่ 4 การทดสอบคาร์บอเนชัน

รูปที่ 5 ระยะความลึกคาร์บอเนชัน

การตรวจสอบค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

การตรวจสอบค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (Cover Depth) โดยการใช้เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กเสริม (Cover meter) รุ่น Profroscope แบบพกพา ทำการตรวจวัดพื้นที่เดียวกันกับการตรวจสอบค่าความลึกของระยะคาร์บอเนชัน แต่ทำการวัดบริเวณละ 20 จุด ใช้เครื่องวัดฯแนบกับผิวหน้าของคอนกรีต (รูปที่ 6) หลังจากนั้นค่อยๆ เลื่อนหาตำแหน่งเหล็กเสริมจากซ้ายไปขวา เมื่อเจอตำแหน่งเหล็กเสริมเครื่องจะเกิดเสียง และโชว์ไฟแสดงสถานะพร้อมแสดงค่าระยะจากผิวคอนกรีตไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริม (รูปที่ 7)

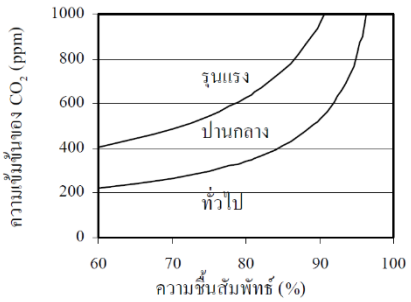
รูปที่ 6 การวัดระยะหุ้มเหล็กเสริม

Figure 7 ระยะหุ้มเหล็กเสริม

การวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์

การตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นการตรวจสอบระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน โดยใช้เครื่องตรวจวัด ExtechCO250 ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในคราวเดียวกัน พื้นที่ทดสอบอยู่ในบริเวณเดียวกันกับการทดสอบก่อนหน้านี้ แต่ละบริเวณจะทำการตรวจวัดจำนวน 3 วัน แต่ละวันทำการตรวจวัด 3 ช่วงเวลา คือ เช้า 07.00 น. – 08.00 น. กลางวัน 12.00 น. – 13.00 น. เย็น 17.00 น. – 18.00 น. วิธีการตรวจวัดเริ่มจากเปิดเครื่องวัดทิ้งไว้ 30 วินาที เครื่องจะแสดงผล 3 ส่วน คือ ค่าความเข้นข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หน่วยวัด ppm อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในหน่วยร้อยละ แต่ละช่วงเวลาทำการตรวจวัดจำนวน 3 ครั้ง (รูปที่ 8) หลังจากนั้นนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้นข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ (รูปที่ 9)

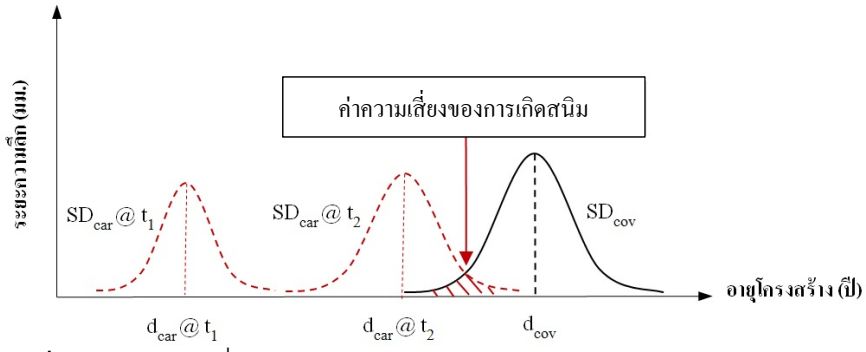
รูปที่ 8 การวัดความเข้มข้น CO_2



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง CO_2 และความชื้นสัมพันธ์

ค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโครงสร้าง เนื่องจากคาร์บอเนชัน

การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโครงสร้าง เนื่องจากคาร์บอเนชัน สามารถหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยประยุกต์จากหลักทางสถิติเกี่ยวกับการแจกแจงความน่าจะเป็นต่อเนื่องของคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2535) โดยสมมติฐานว่าเหล็กเสริมจะเกิดสนิมเมื่อระยะคาร์บอเนชันมีค่าเท่ากับระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก คือ การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Distribution) โดยพิจารณาเส้นโค้งของระยะหุ้มเหล็กเสริม และเส้นโค้งของระยะคาร์บอเนชัน โดยที่จุดสูงสุดของโค้งคือค่าเฉลี่ยของข้อมูล กรณีการกระจายตัวข้อมูลซ้ายและขวาสมมาตรกัน เส้นโค้งที่เป็นระยะหุ้มเหล็กเสริมจะมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ตลอดอายุการใช้งาน ส่วนเส้นโค้งที่เป็นระยะคาร์บอเนชันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งาน เมื่อเส้นโค้งทั้งสองซ้อนทับกันจะแสดงค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโครงสร้าง (รูปที่ 10)



รูปที่ 10 ค่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็กเสริม

จาก (Figure 10) การวิเคราะห์ค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโครงสร้าง เนื่องจากคาร์บอเนชันสามารถใช้สมการแจกแจงปกติ คือ

$$Z = \frac{(X - \bar{X})}{SD} \quad (1)$$

$$Z = \frac{(x - (d_{cov} - d_{car}))}{\sqrt{SD_{cov}^2 + SD_{car}^2}} \quad (2)$$

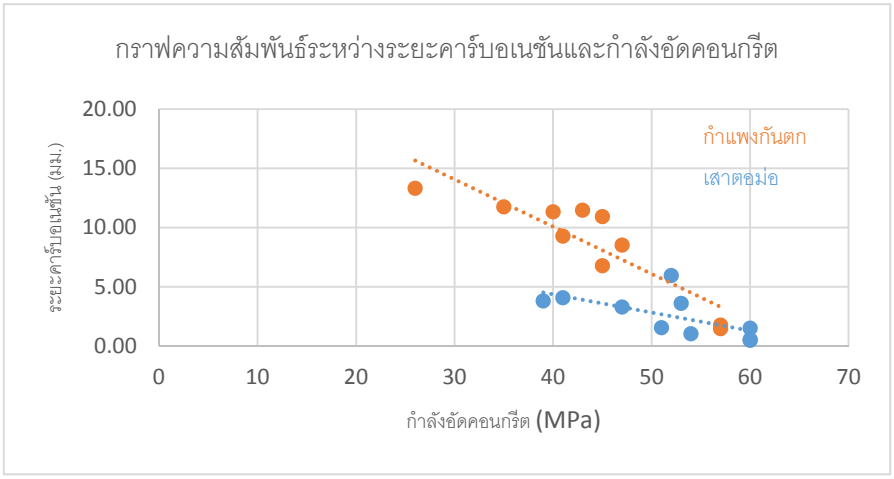
สมการที่ (1) ตัวแปร Z คือ ตัวแปรสุ่มแบบปกติมาตรฐาน (Standard Normal Distribution) X คือ ตัวแปรสุ่ม และ $\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ย และสมการที่ (2) มาจากการแทนค่า $\bar{X}$ และค่า SD โดยค่า X คือตัวแปรสุ่มในที่นี้คือระยะลึกคาร์บอเนชัน ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่พิจารณา โดยที่ d_{cov} คือค่าระยะหุ้มเหล็กเสริม (มม.) ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดอายุของโครงสร้าง d_{car} คือค่าระยะลึกคาร์บอเนชัน (มม.) ที่มีค่าแปรเปลี่ยนตามอายุคอนกรีตโครงสร้าง SD_{cov}^2 คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะหุ้มเหล็กเสริมจะมีค่าคงที่ตลอดอายุโครงสร้าง และ SD_{car}^2 คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะลึกคาร์บอเนชันซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนตามอายุของโครงสร้าง โดยสมการที่ (2) เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้ค่า Z นำไปหาค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโครงสร้างจากตารางตัวแปรสุ่มแบบปกติมาตรฐาน

สำหรับตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้แทนค่าในสมการที่ (2) ได้จากการตรวจสอบข้างต้นที่โครงสร้างจริง และนำมาคำนวณหาค่า k ปัจจุบันจากสมการที่ (3) ตาม มยผ.1332 (2550) โดยที่ X_c คือ ค่าเฉลี่ยระยะลึกคาร์บอเนชันจริงของสายทางนั้น ๆ แยกกัน 2 ส่วน คือ เสาตอม่อ และกำแพงกันตก ค่า α_1 มีค่าเท่ากับ 0.95 เนื่องจากผิวคอนกรีตอยู่สภาพเปียกชื้นขณะใช้งาน ค่า α_2 มีค่าเท่ากับ 1.00 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ ค่า $\sqrt{t}$ เกิดจากรากที่สองของอายุโครงสร้างที่ทำการตรวจสอบ หลังจากนั้นนำค่า k ปัจจุบันไปแทนค่าในสมการที่ (4) เพื่อหาค่า k อนาคตเพื่อหาค่าระยะคาร์บอเนชัน (X_c) ณ ปีที่วิเคราะห์ความเสี่ยงต่อไป

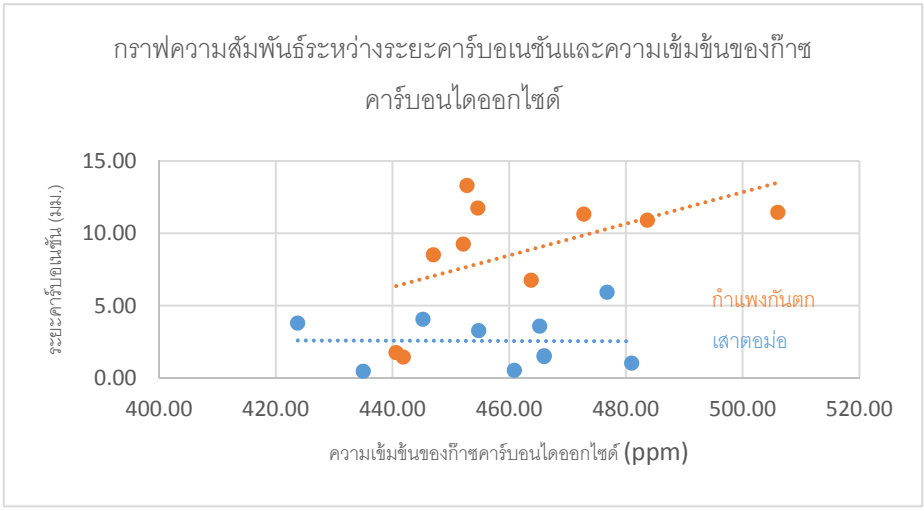
$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

$$k_{(Future)} = k_{(Present)} \cdot \sqrt{(t_{(Future)}/t_{(Present)})} \quad (4)$$

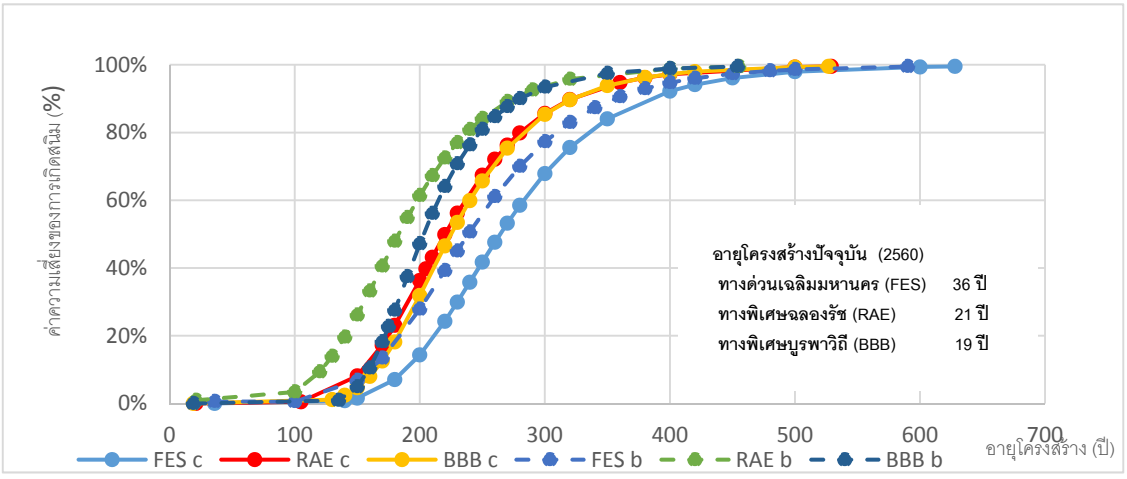
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะคาร์บอเนชันและกำลังอัดคอนกรีต



รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะคาร์บอเนชันและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมและอายุโครงสร้างทางพิเศษ

สรุป

จากการตรวจสอบพบว่าอายุโครงสร้างและสภาพแวดล้อมมีผลต่อระยะความลึกของคาร์บอเนชัน โครงสร้างที่มีอายุมากกว่าจะมีระยะความลึกของคาร์บอเนชันมากกว่า ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมมีผลต่อระยะคาร์บอเนชัน แต่ในการตรวจสอบนี้สภาพแวดล้อมไม่แตกต่างกัน เสาตอม่อมีค่าระยะลึกของคาร์บอเนชันน้อยกว่ากำแพงกันตก ทำให้ค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมช้ากว่ากำแพงกันตก ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กมีผลต่อค่าความเสี่ยงการเกิดสนิม ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มีค่ามากกว่ามีค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมที่ช้ากว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มีค่าน้อยกว่า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการทางพิเศษแห่งประเทศไทยที่อนุเคราะห์พื้นที่สำหรับการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

คู่มือการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างทางพิเศษฉบับปรับปรุง. 2549. **การตรวจสอบประจำ**. การทางพิเศษแห่งประเทศไทย

มาตรฐานการโยธาและผังเมือง. มยผ.1332 - 50. 2550. **มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน**. กรมโยธาธิการและผังเมือง.

มาตรฐานการโยธาและผังเมือง. มยผ.1501 - 51. 2551. **มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย**. กรมโยธาธิการและผังเมือง.

คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์. 2535. **ความน่าจะเป็นและสถิติ**. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บัญญัติ วารินทร์ไหล. 2554. **การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารที่พักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชน**. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

RILEM Committee TC56. 1998. Measurement of hardened concrete carbonation depth. **Draft RILEM recommendation CPC-18, Material and Structure,** 21 (126): 453.

การศึกษาความพรุนของกระเปาะเซรามิกเพื่อออกแบบเซนเซอร์วัดความชื้นดินและอุณหภูมิดิน

A Study of Porosity of Ceramic Bulbs for Design Soil Moisture and Soil Temperature Sensors

ปริยานุช ยวงใย[1*] และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์[1]

Priyanuch Yuangyai[1*] and Taweedej Sirithanapipat[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความพรุนของกระเปาะเซรามิกเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเซนเซอร์วัดความชื้นดินและอุณหภูมิดิน โดยการใช้เซนเซอร์ DHT22 และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 ในการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบระดับความยาวสายไฟ 5 ระดับ คือ 30, 50, 100, 150 และ 200 ซม. เพื่อทดสอบการทำงานและความแม่นยำของเซนเซอร์, การทดสอบความพรุนของกระเปาะเซรามิก 2 รูปแบบ คือ แบบท้ายโค้ง และ แบบท้ายตัด เส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 3 ซม. ความสูง 8 ซม. และความหนา 3 มม. ซึ่งเผาด้วยอุณหภูมิ 800°C , 950°C , 1,100°C และ 1,200°C และการทดสอบความพรุนของกระเปาะเซรามิกในสภาพอากาศปกติกับ การอบร้อนที่อุณหภูมิ 60 - 70°C และการแช่ในกระบะน้ำ เพื่อวิเคราะห์ความพรุนของกระเปาะเซรามิกในแต่ละอุณหภูมิเผา จากการทดสอบพบว่าความยาวของสายไฟไม่มีผลต่อการทำงานของเซนเซอร์, รูปแบบของกระเปาะเซรามิกไม่มีผลต่อการทอสอบ และกระเปาะเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 800°C , 950°C และ 1,100°C มีความพรุนสูงและเหมาะสมในการนำไปพัฒนาและออกแบบเซนเซอร์วัดความชื้นดินและอุณหภูมิดินต่อไป

ABSTRACT

This research aims to investigate the porosity of ceramic bulbs for the design of soil moisture sensors and soil temperature. Using the DHT22 sensor and the Arduino MEGA 2560 microcontroller. The test were 5 - level cables length test were 30, 50, 100, 150 and 200 cm. to test the functionality and the accuracy of sensors, The porosity ceramic bulb testing were 2 types, curve end and cut end. Diameter 3 cm, height 8 cm, thickness 3 mm and different temperatures were burned at 800°C, 950°C, 1,100°C and 1,200°C. And porous ceramic bulbs testing in normal weather as compared to the baked at a temperature 60 – 70 °C and the soaked in water pickup to analyzed the ceramic bulb porosity. The test found that the length of the wires did not affect with sensors, the ceramic bulb patterns did not affect to test. The ceramic bulbs burnt at 800°C and 950°C had high porosity and were suitable for design of soil moisture and soil temperature sensors.

Key Words: porosity, ceramic bulbs, moisture, temperature

*Corresponding author; e-mail address: priyanuch.y@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

เซรามิกที่มีรูพรุนอยู่ในเนื้อเป็นจำนวนมาก หรือ ที่เรียกว่า เซรามิกพรุน ซึ่งในเซรามิกมีความโดดเด่นในด้านการซึมผ่าน เป็นฉนวนความร้อนได้ดี ทนต่ออุณหภูมิสูง สารเคมี และความเป็นกรด-ด่าง เซรามิกพรุนสามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ได้มากมาย เช่น วัสดุกรองสำหรับผลิตน้ำดื่ม ไส้กรองอากาศ อิฐมวลเบา หรือวัสดุสำหรับรับแรงกระแทก (ศันศนีย์,2555)

กรมวิทยาศาสตร์บริการ จึงได้พัฒนาเซรามิกเนื้อพรุนขึ้นเพื่อใช้ในการรักษาความชื้นของดิน โดยใช้วัตถุดิบหลัก คือ ดินตะกอน หรือ sludge จากโรงงานผลิตเซรามิกประเภทสุขภัณฑ์ และเพิ่มอินทรียวัตถุ ร้อยละ 10 ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800-1200 องศาเซลเซียส พบว่า เซรามิกพรุนที่ได้มีน้ำหนักเบาและมีรูพรุนในเนื้อวัสดุมากทำให้สามารถกักเก็บความชื้นได้นาน จึงได้มีการนำเอาเซรามิกพรุนมาใช้ในการเกษตร เพื่อรักษาความชื้นในดินให้คงความชื้นไว้ได้นานขึ้น (ศันศนีย์,2555) เนื่องจากเซรามิกเป็นวัสดุที่สามารถสังเคราะห์ให้มีความพรุนตัวสูง จึงเพิ่มประสิทธิภาพในการอุ้มน้ำและควบคุมการปลดปล่อยน้ำ โดยขนาดและปริมาณของรูพรุนสามารถใช้เป็นวัสดุปลูกแทนดิน สามารถย่อยสลายกลับเป็นดินได้เองภายใน เวลา 5-6 ปี (ศันศนีย์,2555)

ในปัจจุบันเครื่องมือวัดความชื้นในดินที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายอย่าง เทนซิโอมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดความชื้นในดิน เพื่อกำหนดตารางและปริมาณการให้น้ำแก่พืชและยังสามารถใช้ศึกษาทดลองเกี่ยวกับความชื้นในดินได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งเครื่องมือวัดนี้นำเอาคุณสมบัติพิเศษของกระเปาะเซรามิกมาเป็นองค์ประกอบหลักในการวัดค่าความชื้นในดิน โดยใช้หลักการวัดแรงดึงของน้ำในดิน เมื่อเติมน้ำเข้าไปในท่อที่เชื่อมระหว่างกระเปาะเซรามิกกับเครื่องวัดความเครียดและนำไปวัดลงในดิน ถ้าความชื้นในดินสูงจะมีแรงดึงน้อยทำให้ค่าที่อ่านได้จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าดินมีความชื้นน้อยแรงดึงของน้ำในดินจะสูงทำให้ค่าที่อ่านมีค่าสูงขึ้น(บุญแสน,2548) ซึ่งการใช้เทนซิโอมิเตอร์ยังมีข้อจำกัดในการใช้ เช่น การเติมน้ำทุกครั้งเมื่อต้องใช้งาน การเก็บค่าบันทึกผลระยะยาวตำแหน่งการวัดเพียงตำแหน่งเดียว แต่ข้อดีของเครื่องมือคือราคาที่ไม่สูงมากนัก นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือวัดความชื้นในดินโดยใช้ความผันแปรของการนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุพรุนบางชนิด เช่น เซรามิค หรือ Gypsum blocks ที่เรียกว่า แท่งวัดความชื้น หรือ เซนเซอร์วัดความชื้นดิน ดังนั้นความนำไฟฟ้าของแท่งวัดความชื้นหรือเซนเซอร์วัดความชื้นจะแปรผันโดยตรงกับ ระดับความชื้นของดินที่สัมผัสกับแท่งวัดความชื้น จุดเด่นของเครื่องมือวัดนี้คือ การใช้งานที่สะดวกรวดเร็วกว่าเทนซิโอมิเตอร์ แต่ราคาสูงกว่า และบางครั้งอาจต้องนำเข้าจากประเทศ(สมบูรณ์,2551)

DHT22 เป็นเซนเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิในอากาศ มีความแม่นยำในการวัดค่าและเป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านระบบสมองกลฝังตัวได้หลากหลาย เช่น การวัดและควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ระบบบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิและความชื้นในห้อง ด้านการเกษตรสามารถออกแบบระบบควบคุมสภาพอากาศในโรงเรือน หรือ ห้องควบคุมคุณภาพผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากเซนเซอร์ DHT22 มีความแม่นยำสูงในการและมีราคาถูก เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิในกลุ่มเดียวกันอย่าง DHT11, SHT15 หรือ SHT11

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความพรุนของกระเปาะเซรามิกและการทำงานของเซนเซอร์ DHT22 โดยการทดสอบวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิของเซนเซอร์ที่ความยาวของสายไฟที่ 5 ระดับ การทดสอบความพรุนกระเปาะเซรามิก 2 รูปแบบ คือ แบบท้ายโค้งและแบบท้ายตัด ที่ $T_{เผา=800\,^{o}C}$, $T_{เผา=950\,^{o}C}$ $T_{เผา=1,100\,^{o}C}$ และ $T_{เผา=1,200\,^{o}C}$ ในสภาพอากาศปกติกับการทดสอบที่ 2 สถานะคือ การอบร้อนที่อุณหภูมิ 60 - 70°C และการแช่ในกระบะน้ำ เพื่อศึกษาความพรุนของกระเปาะเซรามิก และนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบเซนเซอร์วัดความชื้นดินและอุณหภูมิดินต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดสอบวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิของ เซนเซอร์ DHT22 กับ ความยาวสายไฟ 5 ระดับ

ติดตั้งเซนเซอร์ DHT22 กับความยาวของสายไฟ 5 ระดับ คือ 30, 50, 100, 150 และ 200 ซม. สายไฟที่ใช้ รุ่น CSA type TR-64, ขนาด AWG 64 (0.5 มม.) ทนความร้อนได้สูงสุดถึง 80°C และติดตั้งเซนเซอร์กับแผงไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 เชื่อมอุปกรณ์เข้ากับคอมพิวเตอร์ เขียนโปรแกรมในการสั่งการเซนเซอร์เพื่อให้วัดค่าและแสดงผลความชื้นและอุณหภูมิ ใช้เวลา 2 ชั่งโมง ในสภาพอากาศปกติ ที่อุณภูมิห้อง บันทึกผลการทดสอบเซนเซอร์ เพื่อวิเคราะห์ผลของเซนเซอร์ภายในกระเปาะเซรามิกที่ความยาวแตกต่างกัน (Figure 1)

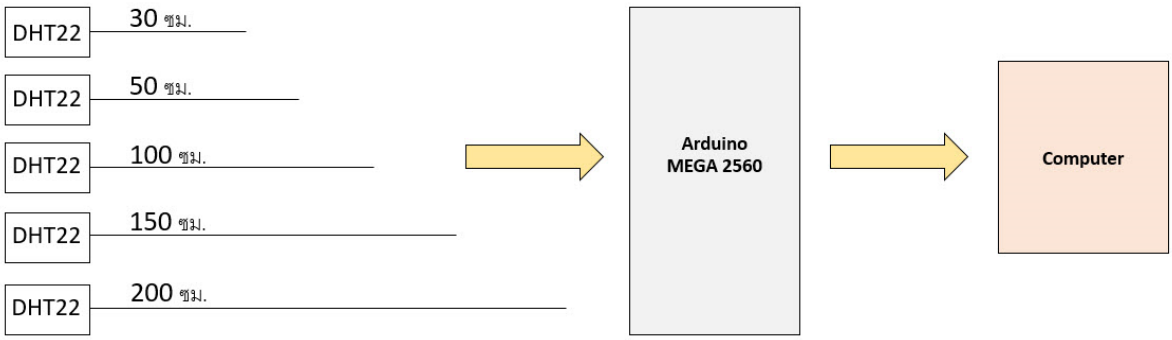


Figure 1 Testing DHT22 with 5 Levels Cables length

การทดสอบกระเปาะเซรามิก 2 รูปแบบ ด้วยการอบร้อนและการแช่ในกระบะน้ำ

ติดตั้งเซนเซอร์ DHT22 เข้ากับกระเปาะเซรามิก 2 แบบ คือ แบบท้ายตัดและแบบท้ายโค้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ซม. สูง 8 ซม. และหนา 3 มม. ซึ่งในการทดสอบเซนเซอร์กับกระเปาะเซรามิกที่ 4 อุณหภูมิเผา คือ $T_{เผา=800\,^{o}C}$, $T_{เผา=950\,^{o}C}$ $T_{เผา=1,100\,^{o}C}$ และ $T_{เผา=1,200\,^{o}C}$ ติดตั้งเซนเซอร์กับแผงไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 เชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับคอมพิวเตอร์ เขียนโปรแกรมในการสั่งการเซนเซอร์ ในการทดสอบความพรุนกระเปาะเซรามิกในสภาพอากาศปกติจะทำการทดสอบที่ 2 สถานะ ดังนี้

การอบร้อนด้วยตู้อบร้อนอุณหภูมิสูง โดยการนำกระเปาะเซรามิกที่ติดตั้งด้วยเซนเซอร์ในสภาพอากาศปกติ อบร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60 - 70°C เป็นการทดสอบความพรุนโดยวิเคราะห์การซึมผ่านความชื้นและอุณหภูมิ

จากภายในกระเปาะเซรามิกออกสู่ภายนอก ทำให้ความชื้นภายในกระเปาะเซรามิกลดลง โดยกำหนดให้ความชื้นที่ต่ำที่สุดภายในกระเปาะเซรามิกอยู่ที่ประมาณ %RH = 10 และอุณหภูมิสูงไม่เกิน 70°C

การแช่กระเปาะเซรามิกในกระบะน้ำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่อุณหภูมิน้ำที่ 23 °C เป็นการทดสอบความพรุนโดยการซึมผ่านความชื้นและอุณหภูมิจากภายนอกเข้าสู่ภายใน ทำให้ความชื้นเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ความชื้นภายในกระเปาะเซรามิกอยู่ที่ประมาณ %RH = 99.99

จากนั้นวิเคราะห์ผลจากการทดสอบและเปรียบเทียบระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงของกระเปาะเซรามิกทั้ง 2 รูปแบบ ที่แต่ละอุณหภูมิของการเผา (Figure 2 ,3 and 4)

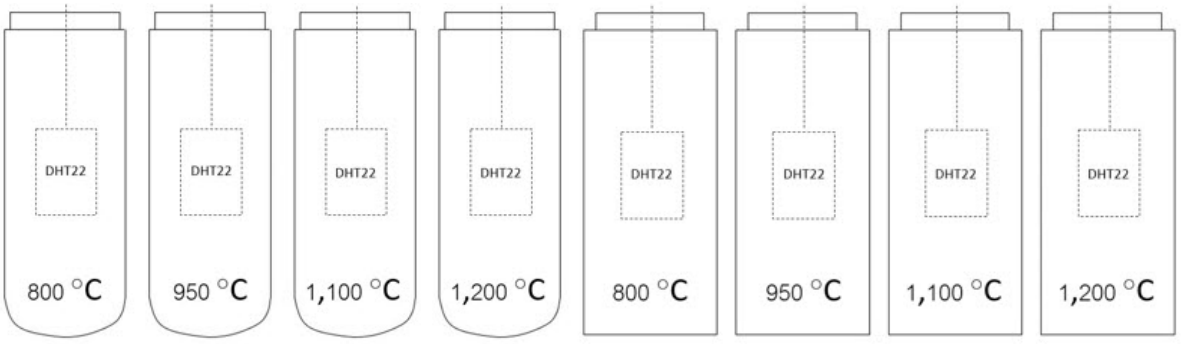


Figure 2 The ceramic bulb 2 Types (curve end (a) end and cut end (b))

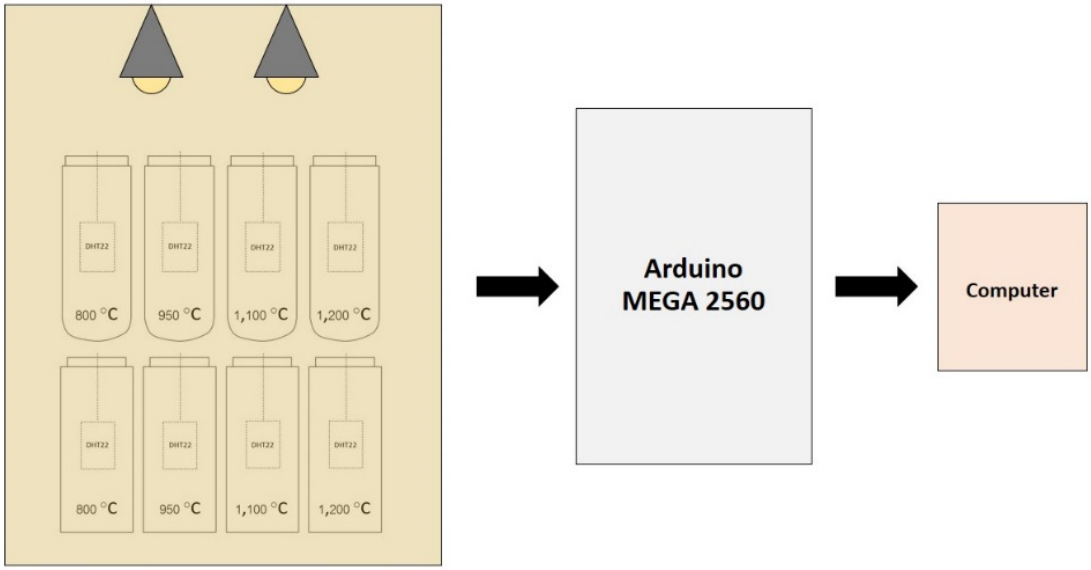


Figure 3 Ceramic porosity testing at T_{beked}=60-70 ^{O}C

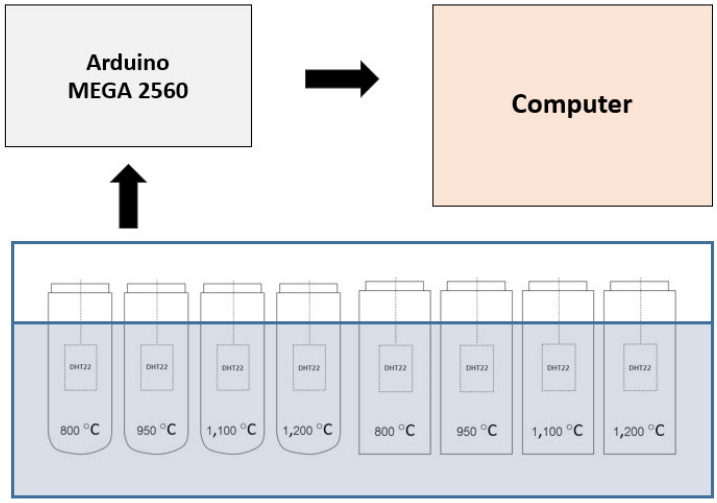
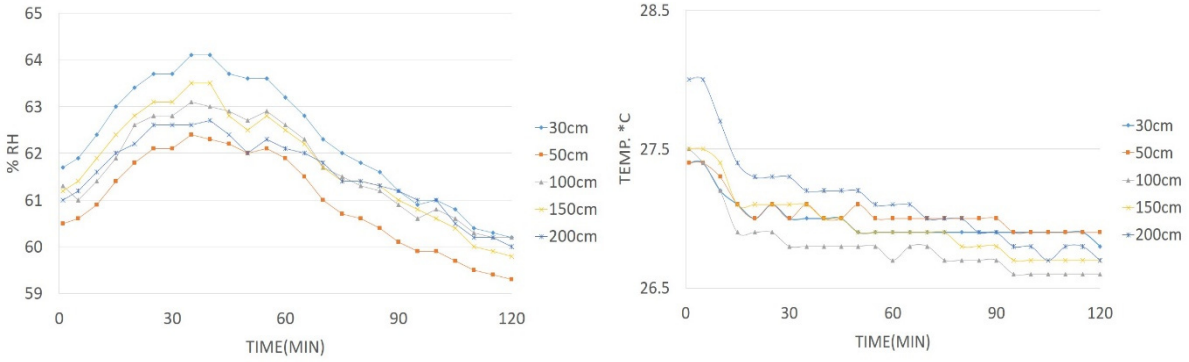


Figure 4 Ceramic porosity testing at water tank

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดสอบเซนเซอร์ DHT22 กับความยาวของสายไฟ 5 ระดับ

การทดสอบเซนเซอร์ DHT22 กับความยาวสายไฟ 5 ระดับ พบว่าความยาวของสายไฟไม่มีผลกระทบในการวัดค่าหรือการส่งข้อมูลในระยะใกล้หรือ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าความชื้นและอุณหภูมิที่วัดได้จากความยาวสายทั้ง 5 ระดับ มีความสอดคล้องและใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าวัดได้มีค่าความเคลื่อนระหว่างเซนเซอร์เฉลี่ย ± 2 %RH และ ± 1 °C ตามลำดับ การทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ DHT22 ความแม่นยำสูงในการวัดค่า (Figure 5)



(a) (b)

Figure 5 %RH (a) and Temperature (b) (DHT22 with 5 Levels Cables length)

การทดสอบความพรุนของกระเปาะเซรามิก 2 รูปแบบ (แบบท้ายโค้ง และ แบบท้ายตัด)

จากการทดสอบกระเปาะเซรามิก 2 แบบ คือ แบบท้ายโค้ง และแบบท้ายตัด ที่เผาอุณหภูมิ แตกต่างกัน พบว่า ผลการวัดความชื้นและอุณหภูมิของกระเปาะเซรามิกทั้ง 2 แบบ มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าคลาดเคลื่อน ± 2-5 %RH และ ± 1°C โดยประมาณ และการซึมผ่านความชื้นและอุณหภูมิเข้าออกของกระเปาะเซรามิก ทั้ง 2 แบบ เมื่อ

เปรียบเทียบกับเวลา การทดสอบด้วยการอบร้อนกระเปาะเซรามิคทั้งสอง ค่าความชื้นเริ่มลดลงใช้เวลา 4-5 นาที และลดลงจนถึง %RH = 10 ใช้เวลา 20 นาที โดยประมาณ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของเวลา ± 1 นาที และการทดสอบแช่ในกระน้ำพบว่าค่าความชื้นเริ่มเพิ่มขึ้นใช้เวลา 4-5 นาที และเพิ่มขึ้นสูงสุด %RH = 99.99 ใช้เวลา 10 นาที ดังนั้นรูปแบบของกระเปาะเซรามิกไม่มีผลในการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิ (Figure 6 – 9)

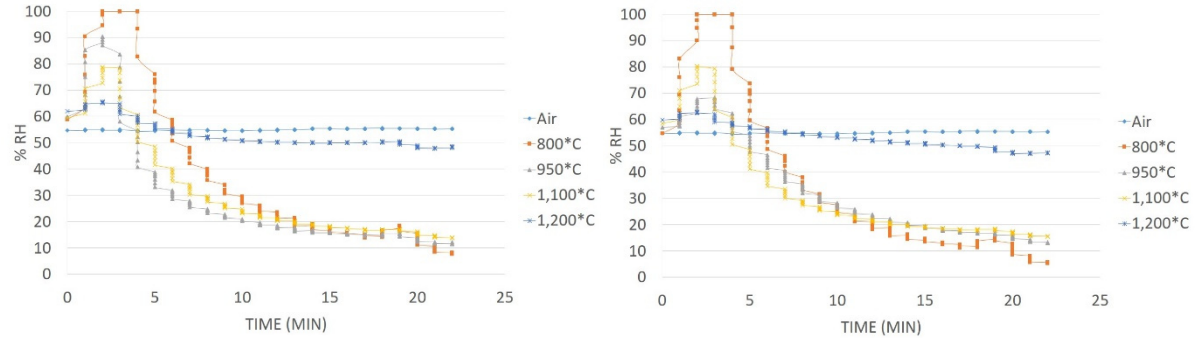


Figure 6 %RH of Ceramic porosity testing by baked @ T = 60-70 °C (curve end (a) and cut end (b))

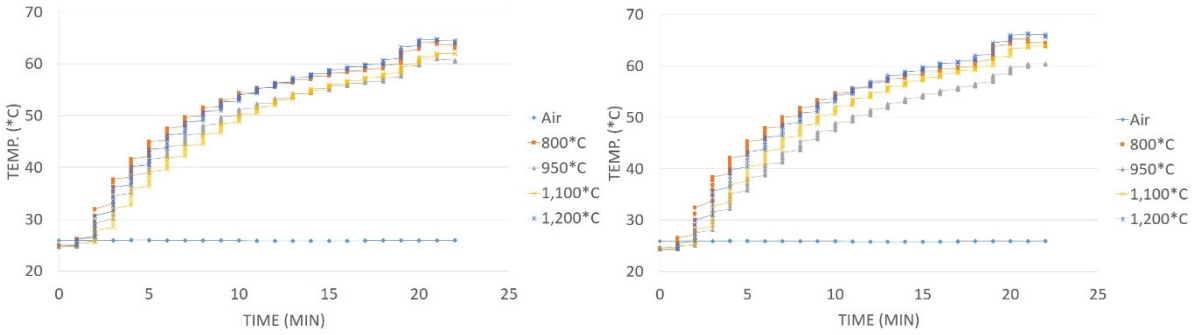


Figure 7 Temperature of ceramic porosity testing by baked @ T = 60-70 °C (curve end (a) and cut end (b))

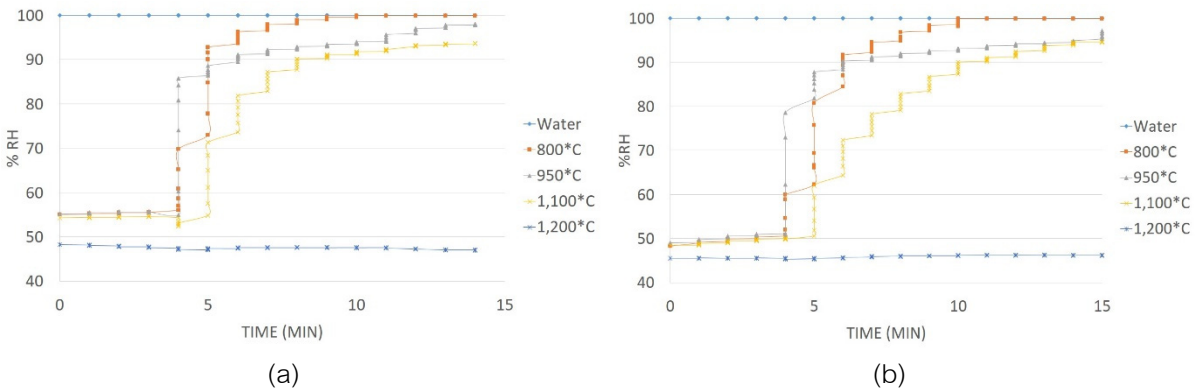
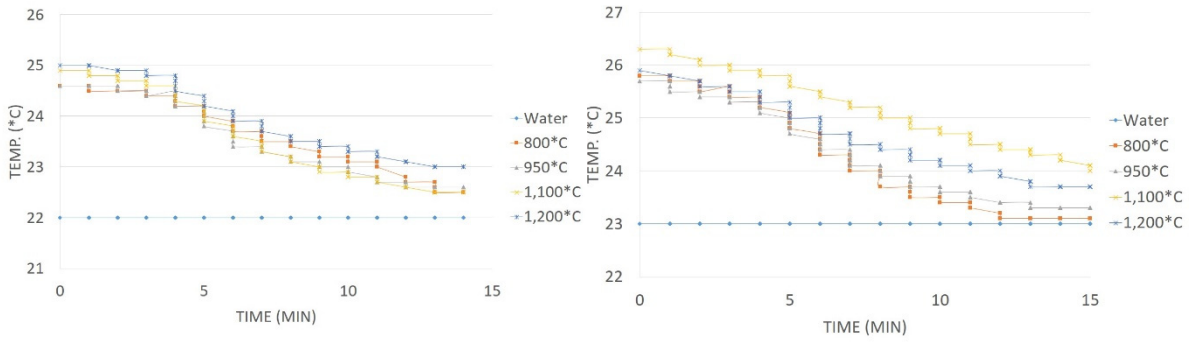


Figure 8 %RH of Ceramic porosity testing in water tank (curve end (a) and cut end (b))



(a) (b)

Figure 9 Temperature of Ceramic porosity testing in water tank (curve end (a) and cut end (b))

การทดสอบความพรุนของกระเปาะเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 4 ระดับ

การอบร้อนกระเปาเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 4 ระดับ ในสภาพอากาศปกติ จากการทดสอบพบว่าในช่วงเวลา2 – 3 นาที %RH ภายในกระเปาะเซรามิกมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความชื้นสะสมภายในกระเปาะเซรามิก ซึ่งการอบร้อนดังกล่าวจะทำให้ %RH ภายในกระเปาะเซรามิกมีค่าลดลง เนื่องจากกระเปาะเซรามิกอยู่ในสภาพที่แห้งสนิท ซึ่งจากการทดสอบพบว่า %RH ภายในกระเปาะเซรามิก $T_{เผา=800\ ^oC}$,$T_{เผา=950\ ^oC}$ และ $T_{เผา=1,100\ ^oC}$ ลดลง เมื่อผ่านไป 5 นาที และลดลงอย่างต่อเนื่อง %RH ของกระเปาะเซรามิกที่ $T_{เผา=800\ ^oC}$,$T_{เผา=950\ ^oC}$ และ $T_{เผา=1,100\ ^oC}$ ต่ำสุดเมื่ออุณหภูมิอบร้อนที่ 70°C ตามลำดับ แต่ %RH กระเปาะเซรามิกที่ $T_{เผา=1,200}$ มีการเปลี่ยนปลงเพียงเล็กน้อย

การแช่กระเปาะเซรามิกในกระบะน้ำ ที่อุณหภูมิเผาทั้ง 4 ระดับ ในสภาพอากาศปกติ พบว่าในช่วงเวลา 5 นาที %RH ของกระเปาะเซรามิกที่ $T_{เผา=800\ ^oC}$,$T_{เผา=950\ ^oC}$ และ $T_{เผา=1,100\ ^oC}$ มีการเปลี่ยนแปลงและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการทดสอบ %RH ของกระเปาะเซรามิกที่ $T_{เผา=800\ ^oC}$ สูงที่สุดเมื่อเทียบกับ $T_{เผา=950\ ^oC}$ และ $T_{เผา=1,100\ ^oC}$ แต่ %RH กระเปาะเซรามิกที่ $T_{เผา=1,200}$ มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากอย่างเห็นได้ชัด

ในการทดสอบดังกล่าวทำให้ทราบว่าการซึมผ่านของอากาศและน้ำที่เข้าออกของกระเปาะเซรามิก เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาแสดงให้เห็นว่า ที่ $T_{เผา=800\ ^oC}$ และ $T_{เผา=950\ ^oC}$ และ $T_{เผา=1,100\ ^oC}$ มีความพรุนสูง ตามลำดับ แต่กระเปาะเซรามิกที่ $T_{เผา=1,200\ ^oC}$ มีความพรุนต่ำ จากการเปรียบเทียบจากการทดสอบ %RH สูงสุดและต่ำสุด ดังนั้นอุณหภูมิในการเผาของกระเปาะเซรามิก มีผลต่อต่อการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิ

สรุป

จากการทดสอบความพรุนของกระเปาะเซรามิกและการทำงานของเซนเซอร์ DHT22 พบว่า ความยาวของสายไฟไม่มีผลกระทบต่อการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิของเซนเซอร์ สามารถใช้เซนเซอร์หลายตัวในหลายตำแหน่งได้ การทดสอบกระเปาะเซรามิก 2 รูปแบบ คือ แบบท้ายโค้งและแบบท้ายตัด ผลจากกทดสอบรูปแบบของกระเปาะเซรามิกไม่ผลต่อการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิของเซนเซอร์ และการทดสอบประเปาะเซรามิกด้วยการอบร้อนและการแช่ในกระบะน้ำที่อุณหภูมิ 4 ระดับพบว่ากระเปาะเซรามิกที่ $T_{เผา}$ ต่ำมีความพรุนมาก จึงทำให้มีการซึมผ่านของความชื้นและอุณหภูมิได้ดีและไวกว่ากระเปาะเซรามิกที่ $T_{เผา}$ สูง แต่ด้วยความพรุนที่มีมากทำให้

รูปทรงของกระเปาะเซรามิก มีน้ำหนักเบาและไม่แข็งแรงทำให้เกิดการแตกและเกิดความเสียหายระหว่างทำการทดสอบ จึงต้องมีการออกแบบให้มีความแข็งแรงมากขึ้นในการทดสอบครั้งต่อไป จากการศึกษาดังกล่าวกระเปาะเซรามิกที่ $T_{เผา=800\ ^oC}$,$T_{เผา=950\ ^oC}$ และ $T_{เผา=1,100\ ^oC}$ เหมาะสมในการนำไปใช้พัฒนาและการออกแบบเซนเซอร์วัดความชื้นดินและอุณหภูมิดิน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อ.ดร.ชินวัฒน์ ยัพวัฒนพันธ์ จาก คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับเรื่องเครื่องมือวัดความชื้นดิน

เอกสารอ้างอิง

กรกนก สุพัตรา. 2559. **การเตรียมการหาลักษณะของเซรามิกพรุนแบเรียมออธอไทเทเนต**. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ราชธานีวิชาการ ครั้งที่1. หน้า 1885 – 1893.

บุญแสน เตียวนุกูลธรรม. 2548. **เรื่องความชื้นในดิน**. แหล่งที่มา : http://elearning.nsru.ac.th/web_ elearning /soil /lesson_4_4.php.

พรพิมล สราญรัตน์ และอุเทน. 2557. **การควบคุมตู้อบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนด้วยระบบสมองกลฝังตัว** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ หน้า 16-18.

ศักดิ์ชัย. 2552. **การพัฒนาเครื่องมือวัดความชื้นในดินแบบวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อการเกษตร**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หน้า 4- 20.

ศันศนีย์. 2558. **เซรามิกเนื้อพรุนชนิดเม็ดเพื่อการเก็บความชื้นใต้ผิวดิน** กรมวิทยาศาสตร์บริการ.

ศันศนีย์. 2555. **เซรามิคพรุน**. แหล่งที่มา : http://ceramic.dss.go.th/files/pdf/porous_ceramic.pdf

สมนึก และ ยตันติกร. 2559. **การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือน เพื่อการปลูกผักสวนครัว**. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน.

MEASUREMENT ENGINEERING AUSTRALIA. 2017. Soil Moisture Monitoring. แหล่งที่ : http://mea.com.au/soil-plants-climate/soil-moisture-monitoring/learning-centre/what-is-soil.

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการใช้น้ำประปากับอุณหภูมิในพื้นที่ให้บริการของการประปานครหลวง

Relationship between Potable Water Demand and Temperature in Service Area of Metropolitan Waterworks Authority

ณินาพรรณ์ เมฆไพบูลย์[1*] อดิชัย พรพรหมินทร์[1] สุรชัย ลิปิวัฒนาการ[1] เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล[1]
ยุทธนา ตาละลักษมณ์[1] ดนย์ปภพ มะณี[1] และ ณัฐ มาแจ้ง[1]

Chinnapan Makpiboon[1*], Adichai Pornprommin[1], Surachai Lipiwattanakarn[1],
Ackchai Sirikijpanichku[1], Yutthana Talaluxmana[1], Donpapob Manee[1] and Nat Marjang[1]

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการพัฒนาเมืองนั้นส่งผลต่อความต้องการใช้น้ำประปาเพิ่มขึ้นในอนาคต อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อความต้องการใช้น้ำ โดยเฉพาะปัญหาสภาวะเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและภาวะโลกร้อนจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่อความต้องการใช้น้ำสูงขึ้นเช่นกัน การศึกษาครั้งนี้ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการใช้น้ำประปารายเดือนของการประปานครหลวงในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการ กับอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนของกรุงเทพมหานคร โดยใช้ข้อมูลระหว่างตุลาคม 2551 ถึงกันยายน 2559 รวม 8 ปี โดยในช่วงเวลาดังกล่าวอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนของกรุงเทพมหานครอยู่ระหว่าง 25.2°C และ 31.8°C และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 0.92°C ต่อปี จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ความต้องการใช้น้ำรายเดือนมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนอย่างมีนัยสำคัญ และอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้น้ำรายเดือนมีค่าเท่ากับ 0.0444 ล้าน ลบ.ม.ต่อวันต่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C หรือประมาณ 1.3% ของความต้องการใช้น้ำเฉลี่ยรายเดือน

ABSTRACT

Population growth and urban development have contributed to increasing demand for potable water in the future. However, temperature is an important factor for potable water demand, especially climate change and global warming, which will increase the average temperature and affect the potable water demand. This study examines the relationship between urban potable water demands of Metropolitan Waterworks Authority, in the Bangkok, Nonthaburi and Samut Prakan province, and temperature average monthly temperature of Bangkok. The study period starts from October 2008 to September 2016 total 8 years. During this period, the average monthly temperature in Bangkok was between 25.2°C and 31.8°C and the average trend is about 0.092°C per year. The results showed that monthly potable water demand was significantly correlated with monthly average temperature. The monthly increase in water demand was 0.0444 million cubic meters per day, rising by 1°C, or 1.3% of the average monthly potable water demand.

Key Word: Potable Water Demand, Temperature, Global Warming, Bangkok

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Water Resource Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

เมืองหลวงถือเป็นศูนย์กลางการพัฒนาของประเทศ การเติบโตของเมืองอย่างรวดเร็วต้องมีความพร้อมของระบบสาธารณูปโภคที่เพียงพอต่อประชากรที่หนาแน่นในตัวเมือง ระบบน้ำประปาเป็นสาธารณูปโภคที่สำคัญอย่างยิ่งในการดำรงชีวิตประจำวันของคนเมือง หากเกิดวิกฤตการใช้น้ำประปาในเมืองย่อมกระทบถึงความมั่นคงทางเศรษฐกิจของประเทศเช่นกัน ดังนั้น การค้นหาวิธีการที่เหมาะสมและแม่นยำในการคำนวณหาความต้องการน้ำประปา จึงถือเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะภาวะเศรษฐกิจของโลกที่มีการแข่งขันอย่างสูง ความสามารถในการคาดการณ์ความต้องการน้ำของอนาคต จะใช้วางแผนการระบบของน้ำประปาได้อย่างยั่งยืนไปพร้อมกับความเติบโตของเมืองและความมั่นคงระดับประเทศ

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาจากงานวิจัยในต่างประเทศ ศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อความต้องการใช้น้ำในเมือง พบว่ามีงานวิจัยต่างประเทศที่ศึกษาความต้องการใช้น้ำโดยปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการใช้น้ำคืออุณหภูมิ ตัวอย่างเช่น การศึกษาย่าน Puget Sound ของ Washington สหรัฐอเมริกา {Palmer, 2010} ผลการศึกษาสามารถตรวจสอบความต้องการน้ำและการวางแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน และการทำโมเดลของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับความต้องการของการใช้น้ำในย่าน Essex ราชอาณาจักรอังกฤษ {Goodchild., 2003} ผลการศึกษาแสดงความสัมพันธ์ว่าสภาพอากาศกับความต้องการน้ำในเมืองมีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ

อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกกำลังสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในส่วนของประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบจากภาวะโลกร้อนเช่นกันในรอบ 40 ปีที่ผ่านมาระหว่างปี พ.ศ.2513-2552 อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้น 0.024 °C ต่อปี โดยเฉพาะในเขตพื้นที่เมืองจะเกิดโดมความร้อนหรือ Urban Heat Island อุณหภูมิเขตเมืองสูงกว่ารอบนอก {สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2559; Limsakul, 2012} ซึ่งภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและร่วมกับการขาดแคลนน้ำเพื่ออุปโภคบริโภค

ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการใช้น้ำประปาของการประปานครหลวงพื้นที่กรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการ โดยใช้อัตราน้ำจำหน่ายในแหล่งที่อยู่อาศัย ธุรกิจ รัฐวิสาหกิจ ราชการและอื่นๆ กับค่าอุณหภูมิของกรมอุตุนิยมวิทยา ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2551 ถึงเดือนสิงหาคม 2559 รวมเวลาประมาณ 8 ปี

วิธีการ

วิธีการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

1. รวบรวมข้อมูลการใช้น้ำประปาของการประปานครหลวง
   1.1 ข้อมูลน้ำจำหน่ายของกรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการย้อนหลังตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 – 2559
   1.2 รายงานประจำปีของการประปานครหลวงตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 - 2559 {การประปานครหลวง, 2016}

2. รวบรวมข้อมูลภูมิอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา เช่น ชุดข้อมูลความชื้นสัมพันธ์ ความเร็วลมสูงสุด ทิศทางลมสูงสุด ปริมาณน้ำฝน และอุณหภูมิตุ้มแห้ง ตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 – 2559
3. ปรับแก้ไขข้อมูลที่ไม่ปกติและจัดเรียงข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Microsoft excel
   3.1 จัดเรียงข้อมูลน้ำจำหน่ายรายเดือนของการประปานครหลวง และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลจากข้อมูลน้ำจำหน่ายรายปีในรายงานประจำปีของการประปานครหลวง ซึ่งเมื่อรวมข้อมูลรายเดือนแล้วปรากฏว่าในบางช่วงปี ผลรวมข้อมูลทั้งปีมีความแตกต่างจากผลรายงานการจำหน่ายน้ำประปาในปีงบประมาณนั้น ผู้วิจัยจึงใช้ค่าตัวคูณในการปรับแก้ไขค่ารายเดือนให้มีความถูกต้องกับรายงานประจำปี และเนื่องจากข้อมูลที่ได้รับเป็นข้อมูลปริมาตรน้ำต่อเดือนจึงทำการหารด้วยจำนวนวันของเดือนนั้นๆ เพื่อเปลี่ยนหน่วยเป็นปริมาตรต่อวันของแต่ละเดือน
   3.2 ผู้วิจัยพบว่าค่าการจำหน่ายน้ำประปาในแต่ละรอบเดือนมีลักษณะการแกว่งของข้อมูลมากผิดปกติ (Noise) โดยสังเกตจากความไม่สม่ำเสมอของยอดการจำหน่าย ซึ่งอาจเกิดจากยอดการตัดบิลที่มีรอบวันไม่ตรงกันทุกเดือน ผู้วิจัยจึงได้วิธีการเฉลี่ยค่าสมการ Weighted moving average ที่ใช้ในการปรับแก้ค่า Noise ออกจากข้อมูล แสดงในรูปสมการต่อไปนี้

$$\forall_{avg,i} = \frac{\forall_{i-1} + 2\forall_i + \forall_{i+1}}{4}$$

   โดยที่ $\forall$ คือ ความต้องการใช้น้ำประปารายเดือน $\forall_{avg,i}$ คือ ค่าเฉลี่ยจากวิธี Weighted moving average และ i คือ เดือนที่พิจารณา
   3.3 นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบค่าจำหน่ายน้ำต่ำอย่างผิดปกติในช่วงเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในเดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม 2554 ทำให้ผู้วิจัยต้องลบข้อมูลออก 4 เดือนในช่วงเดือนตุลาคม 2554 ถึงเดือนมกราคม 2555 เพื่อไม่ให้กระทบผลการวิเคราะห์
   3.4 นำข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนจากกรมอุตุนิยมวิทยาจัดเรียงเช่นเดียวกับข้อมูลน้ำจำหน่ายของการประปานครหลวง
4. หาค่าแนวโน้มอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำจำหน่ายต่อเดือนเฉลี่ย
   4.1 นำข้อมูลอัตราการจำหน่ายน้ำประปานครหลวงที่ได้ปรับแก้แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามระยะเวลาเพื่อหาค่า m หรือค่าความลาดชันจากสมการเส้นตรง y = mx + C

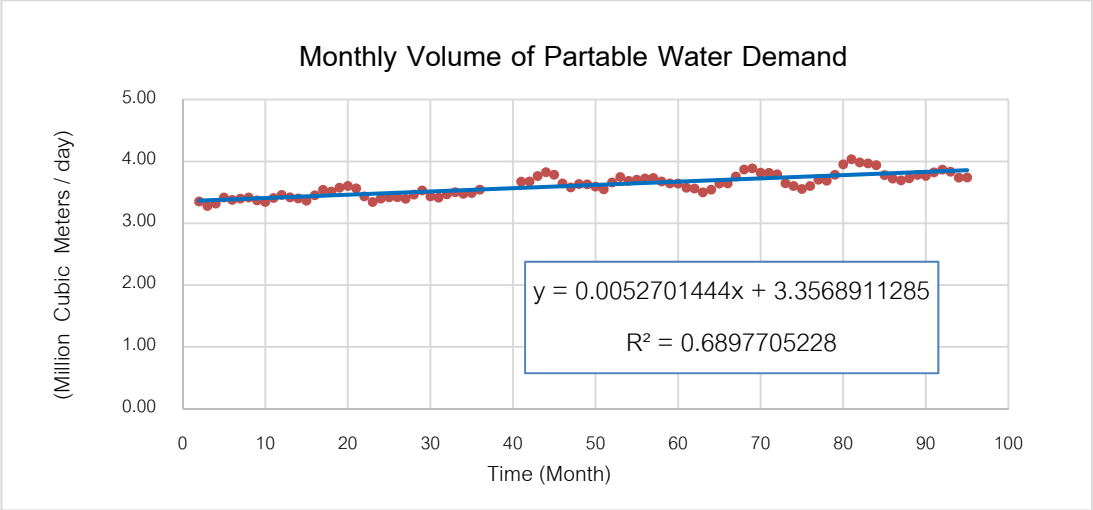


Figure 1 Monthly volume of portable water demand

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นความต้องการใช้น้ำประปาในเขตพื้นที่ให้บริการของการประปานครหลวงในช่วงระยะเวลาพฤศจิกายน 2551 ถึงสิงหาคม 2559 รวมเวลาประมาณ 8 ปี ความต้องการน้ำประปาเฉลี่ยวันละประมาณ 3.36 ล้านลูกบาศก์เมตร แนวโน้มของการใช้น้ำประปาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉลี่ย 63,242 ลูกบาศก์เมตรต่อปี

4.2 นำค่า m = 0.0052701444 ล้าน ลบ.ม.ต่อวัน มาปรับให้อยู่ในเดือนฐาน หรือก็คือปรับค่าความลาดชันเป็นศูนย์ ด้วยการลบแนวโน้มของปริมาตรน้ำจำหน่ายที่เพิ่มขึ้น m x จำนวนเดือน จากค่าการจำหน่ายน้ำประปาต่อเดือนเฉลี่ยของเดือนนั้น

5. นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการใช้น้ำประปาและอุณหภูมิว่ามีลักษณะสอดคล้องกันหรือไม่ พร้อมสร้างกราฟที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการใช้น้ำประปาและอุณหภูมิ

ผลและวิจารณ์

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้น้ำรายเดือนที่ได้ปรับแก้ ปรับฐาน และทำการเฉลี่ยด้วยวิธี Weighted Moving Average และอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนกับเวลา โดยที่ให้พฤศจิกายน 2551 เป็นเดือนที่ 1 พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนของกรุงเทพมหานครอยู่ระหว่าง 25.2°C ถึง 31.8°C มีค่าเฉลี่ย 29.1 °C ส่วนอัตราการใช้น้ำอยู่ระหว่าง 3.16 ถึง 3.61 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีค่าเฉลี่ย 3.36 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในภาพรวมช่วงที่มีอัตราความต้องการน้ำประปาสูงกว่าค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณเดือนกุมภาพันธ์ถึงกรกฎาคมของทุกปีหรือในช่วงฤดูร้อน และช่วงมีการอัตราการใช้น้ำน้อยที่สุดของเกือบทุกปีจะอยู่ช่วงฤดูหนาวประมาณธันวาคมถึงมกราคม แสดงถึงอัตราการใช้น้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (Seasonal change) หรือมีแนวโน้มตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง

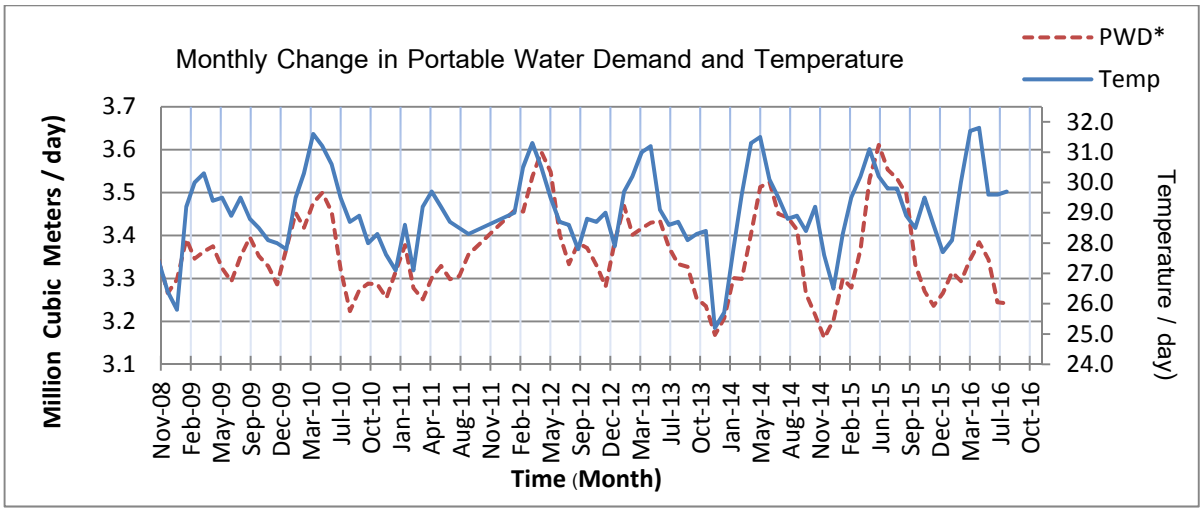


Figure 2 Monthly Variation of Portable Water Demand Volume (PWD*) and Temperature from November 2008 to October 2016.

ผลจากการศึกษาแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำประปาและอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางใกล้เคียงกัน นั้นหมายถึงการใช้น้ำประปามีทิศทางการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพอุณหภูมิ

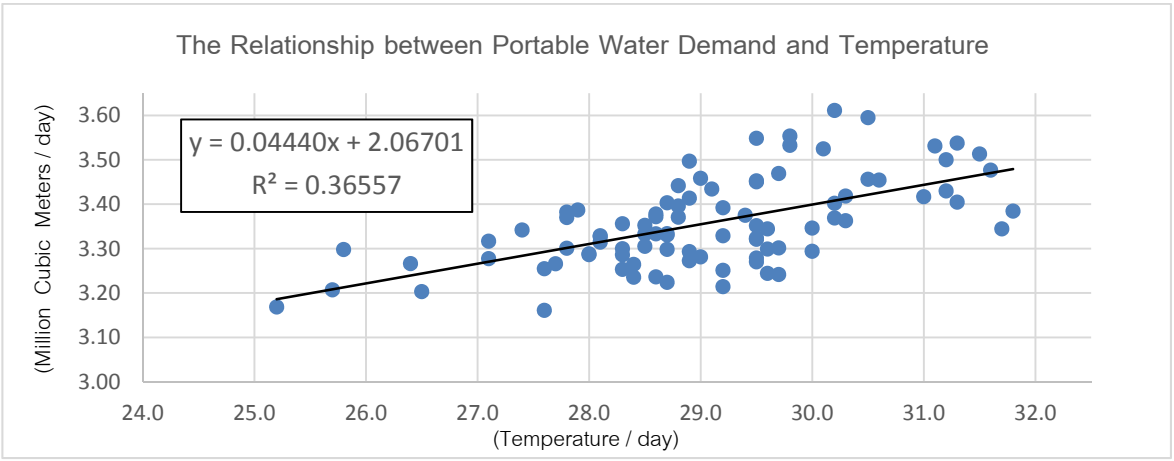


Figure 3 Relationship between Potable Water Demand and Temperature

วิธีการคำนวณปริมาณความต้องการน้ำแบบ Simple Linear Regression {Froukh, 2001} แสดงดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างการใช้น้ำประปากับอุณหภูมิ มีความสัมพันธ์กันผลจากสมการเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C จะมีแนวโน้มการใช้น้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 44,400 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่า พ.ศ. 2551-2559 ระยะเวลา 8 ปี อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนเท่ากับ 29.1 °C และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 0.092°C ต่อปี (ดังรูปที่ 2) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ.2513-2550 ระยะเวลา 38 ปี อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณปีละ 0.024°C ต่อปี {Limsakul, 2012} พบว่างานวิจัยนี้ให้ค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงกว่างานวิจัยที่ผ่านมาเท่ากับ 0.068 °C ต่อปี ซึ่งผู้วิจัย

สันนิษฐานว่า เนื่องจากข้อมูลในงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลเฉพาะกรุงเทพมหานคร และในช่วงปี 10 ปีที่ผ่านมา มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงขึ้นจากในอดีต เนื่องจากมีการใช้พลังงานต่างๆ เพิ่มขึ้นและการขยายตัวของเมืองเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งกระตุ้นให้เกิดภาวะโดมความร้อนหรือ Urban Heat Island ตามที่กล่าวไว้ในข้างต้น

ความต้องการใช้น้ำในพื้นที่เมือง นอกจากข้อมูลทางด้านอุณหภูมิแล้ว ยังคงมีอีกหลายปัจจัยที่สามารถนำมาเป็นข้อมูลให้การคาดการณ์หรือการทำนายการใช้ปริมาณน้ำในอนาคตที่ถูกต้องมากขึ้น ตัวอย่างเช่น กรณีศึกษาความต้องการน้ำของสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ {Al-Mualla, 2010} มีการนำปัจจัยอื่นๆ เช่น ข้อมูลของประชากร ปริมาณน้ำฝน และกิจกรรมหรือการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ มารวมพิจารณาหาแนวโน้มการใช้น้ำในอนาคต นอกจากปัจจัยของข้อมูลแล้ว การเลือกวิธีการหรือเครื่องมือในการทำนายก็จะส่งผลถึงค่าการคาดการณ์ที่ถูกต้อง วิธีการคาดการณ์ความต้องการใช้น้ำมีหลากหลายวิธี {Ghiassi, 2008} ตัวอย่างเช่น Autoregressive integrated moving average (ARIMA) Artificial neural network (ANNs) Spatially explicit ordinary least squares regression (OLS) และ Geographically weighted regression (GWR) ซึ่งรวมถึงการนำเทคโนโลยีทาง GIS หรือการใช้เทคโนโลยีเชิงพื้นที่มารวมพิจารณาด้วย ทั้งนี้ยังต้องคำนึงถึงเวลาระยะที่ความต้องการคำนวณ ลักษณะ/ขนาดของพื้นที่ ลักษณะสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศเฉพาะของพื้นที่ศึกษาร่วมด้วย

สรุป

การใช้น้ำในเขตกรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี และสมุทรสาคร มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในช่วงมีอุณหภูมิสูงหรืออากาศที่ร้อนขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้น้ำรายเดือนสูงขึ้นประมาณ 44,400 ลูกบาศก์เมตรต่อวันต่อ 1°C หรือประมาณ 1.3% ของความต้องการใช้น้ำเฉลี่ยรายเดือน การศึกษาครั้งนี้เป็นการนำปัจจัยเพียงด้านอุณหภูมิเท่านั้น หากมีการศึกษาค้นคว้าถึงปัจจัยอื่นและวิธีการที่เหมาะสม จะยิ่งทำให้การคาดการณ์แนวโน้มอัตราการใช้น้ำในเขตเมืองมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น เพื่อสามารถวางแผนระบบการประปาที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณการประปานครหลวง และกรมอุตุนิยมวิทยาที่อนุเคราะห์ข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

การประปานครหลวง. 2016. **รายงานประจำปี 2559 การประปานครหลวง**.

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 2559. **รายงานการสังเคราะห์และประมวลสถานภาพองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของไทย ครั้งที่ 2 พ.ศ. 2559**.

Al-Mualla, M. M. M. a. A. 2010. **Water Demand Forecasting in Umm Al-Quwain (UAE) Using the IWR-MAIN Specify Forecasting Model**. Springer: 27.

Froukh, M. L. 2001. **Decision-Support System for Domestic Water Demand Forecasting and Management**. Water Resources Management, the Netherlands.

Ghiassi, M., D. K. Zimbra and H. Saidane. 2008. **Urban water demand forecasting with a dynamic artificial neural network model**. Journal of Water Resources Planning and Management. 134 (2): 138-146.

Goodchild., C. W. 2003. **Modeling the impact of climate change on domestic water demand**. The Journal. V17 N1: 5.

Limsakul, S. L. a. A. 2012. **Atmospheric Research: Trends in Thailand pan evaporation from 1970 to 2007**. ELSEVIER: 6.

Palmer, A. S. P. a. R. N. 2010. **Seasonal Residential Water Demand Forecasting for Census Tracts**. JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT © ASCE / JANUARY/FEBRUARY: 10.

การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ทำให้เกิดของเสียในการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่

Correlational Study of Waste Generation Factors from Large Building Construction Project

เทอดศักดิ์ มุนีนารถ[1*] ศิรเดช สุริต[1] และ นวลวรรณ ทวยเจริญ[1]

Terdsak Muneenart[1*], Siradech Surit[1] and Nuanwan Tuaycharoen[1]

บทคัดย่อ

ปัญหาด้านของเสียภายในสถานที่ก่อสร้างมีผลกระทบกับสิ่งแวดล้อม ที่ผ่านมามีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการเกิดของเสียกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อสร้าง อย่างไรก็ตามการศึกษาความสัมพันธ์ในเชิงกระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นการศึกษาในต่างประเทศ จึงอาจไม่สอดคล้องกับบริบทในประเทศไทย การศึกษาครั้งนี้ใช้แผนผังสาเหตุและผลเป็นตัวกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างเป็นหมวดหมู่ ดังต่อไปนี้คือ บุคลากร กระบวนการ วัสดุ และเครื่องจักร การศึกษาเน้นที่โครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในการศึกษานี้ได้ทำการสร้างรายการสัมภาษณ์บุคคลที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง โดยแบบสัมภาษณ์มี 3 ส่วน คือ 1.การสอบถามข้อมูลลักษณะเฉพาะของโครงการก่อสร้าง 2. ข้อมูลแผนผังภายในสถานที่ก่อสร้าง และ 3. ข้อมูลรายการวัสดุเพื่อการประมาณราคาและรายการบันทึกการก่อสร้างจริง จากนั้นนำข้อมูลในแต่ละหมวดประมวลผลเป็นตัวเลขและนำไปวิเคราะห์ ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้น จากนั้นจึงนำมาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับการเกิดของเสีย เพื่อนำไปใช้ในการคัดกรองปัจจัยสำหรับการสร้างระบบเครือข่ายใยประสาทเทียมในการศึกษาลำดับต่อไป

ABSTRACT

Waste in construction site has environmental impact. There were some correlational studies of waste generation and related factors in construction sites. However, most studies are aboard and may be applicable in Thailand context. This study used cause and effect diagrams to determine factors related to construction project and then analyzed the correlation between the construction site's characteristic factors and waste generation. In this study, the construction site's characteristic factors were assumed and defined into 4 categories; man, management, material and machine. The study focused on large construction site in Bangkok Metropolitan Area. In this study, the survey forms were created and then interviewed with person who related to the construction project. The surveying was divided into 3 parts 1.) Site characteristics 2.) Site planning/layout and 3.) Bill of material for cost estimation and as-built data. The data from the survey were calculated into numerical values and ranked the priority of site characteristic factors and waste generation factors using linear regression analysis. The correlated factors were selected as the input layer of the Artificial-Neural Network in the further study.

Key Word: waste, waste generation, construction

[*]Corresponding author; E-mail address : **terdsak.m@ku.th**

[1]ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี โดยในปี พ.ศ. 2559 พบว่าขยะมูลฝอยในประเทศไทย มีปริมาณ 27.06 ล้านตัน คิดเป็นอัตราการเกิดขยะมูลฝอย 1.14 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน (กรมควบคุมมลพิษ,2559) ในปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้างมีการขยายตัวมากขึ้น ทั้งการก่อสร้างในแนวราบ แนวดิ่ง การก่อสร้างเกี่ยวกับสาธารณูปโภค หรือการซ่อมแซมอาคาร ในการก่อสร้างอาคารครั้งหนึ่ง มีผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยเฉพาะปัญหาด้านของเสียภายในสถานที่ก่อสร้าง ซึ่งของเสียภายในสถานที่ก่อสร้าง มีทั้งขยะมูลฝอย ขยะที่เกิดจากกระบวนการก่อสร้างและขยะอันตราย เป็นต้น วิธีการจัดการของเสียภายในสถานที่ก่อสร้างอาจแตกต่างกันออกไปตามนโยบายขององค์กร

แผนผังสาเหตุและผลเป็นแผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหากับสาเหตุทั้งหมดที่อาจก่อให้เกิดปัญหา หรือรู้จักในชื่อของแผนผังอิชิกาว่า (Ishikawa diagram) ซึ่งได้รับการพัฒนาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1943 โดย ศาสตราจารย์คาโอรุ อิชิกาว่า แห่งมหาวิทยาลัยโตเกียว ผู้ศึกษาสามารถที่จะกำหนดกลุ่มปัจจัยต่าง ๆ แต่ต้องมั่นใจว่ากลุ่มที่ศึกษาที่กำหนดไว้เป็นปัจจัย สามารถที่จะช่วยให้ผู้ศึกษาสามารถแยกและกำหนดสาเหตุได้อย่างเป็นระบบ และเป็นเหตุเป็นผล

ในการก่อสร้าง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ถูกอ้างถึงอย่างแพร่หลายคือ “4M 1E” โดยมาจาก 1. ปัจจัยมนุษย์ (man) คือ บุคลากร คนงาน หรือพนักงาน 2.ปัจจัยเครื่องจักร (machine) คือ เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อำนวยความสะดวก 3.ปัจจัยวัสดุ (material) คือ วัตถุดิบ อะไหล่หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในกระบวนการ 4.ปัจจัยวิธีการ (method) คือ กระบวนการทำงาน ในบางกรณีจะมีการพิจารณาถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (environment) คือ อากาศ สถานที่ ความสว่าง และบรรยากาศการทำงาน ประกอบด้วย โดยในส่วนของสิ่งแวดล้อม ไม่ได้นำมาเป็นสมมุติในการกำหนดสาเหตุ (ประชาสรรณ์, 2547)

มีการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของการเกิดของเสียในงานก่อสร้างกับปัจจัยต่าง ๆ หลายการศึกษา อาทิเช่น Andrea Parisi Kern et al. (2015) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดของเสียในอาคารสูง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นของอาคารสูงและการเกิดของเสีย Mohd Reza Esa et al. (2017) ศึกษากลยุทธ์ในการลดการก่อสร้างและการกำจัดของเสียในประเทศมาเลเซีย พบว่าปัจจัยการเกิดของเสียที่ในสถานที่ก่อสร้างเกิดตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ การวางแผนงานและขั้นตอนการจัดซื้อ การศึกษาทำโดยการส่งแบบสอบถามไปยังสถานที่ก่อสร้าง เพื่อสำรวจข้อมูล อย่างไรก็ตามผลการศึกษาดังกล่าวยังไม่ได้ศึกษาปัจจัยพื้นฐานของการเกิดของเสียที่ภายในสถานที่ก่อสร้าง ว่ามีปัจจัยจากกระบวนการใดในสถานที่ก่อสร้างบ้าง

Saheed O. Ajayi et al.(2017) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดหาวัสดุสำหรับการลดของเสียจากการก่อสร้าง: การสำรวจปัจจัยที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกกับบุคคลที่เกี่ยวข้อง และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และคัดเลือกข้อมูลเพื่อแปรผลเป็นข้อมูลของแบบสอบถาม พบว่าปัจจัยที่สำคัญในการลดของเสียผ่านทางกระบวนการจัดซื้อ คือ การจัดการขนส่งวัสดุที่มีประสิทธิภาพ จำนวนของของ

เสียที่ไม่ได้คุณภาพ จัดหาวัสดุที่มีการใช้เทคโนโลยีการใช้บรรจุภัณฑ์น้อย และระบบการขนส่งที่ตรงเวลาและป้องกันการสั่งซื้อที่เกินต้องการมากเกินไป

ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อรวบรวมข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อสร้างกับการเกิดของเสีย เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองพยากรณ์ความสัมพันธ์ระหว่างแนวโน้มกับการเกิดของเสียในการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ โดยสามารถพัฒนาเป็นเครื่องมือช่วยลดของเสียที่เกิดขึ้นภายในสถานที่ก่อสร้างและเป็นแนวทางหลักของการจัดการของเสียของภายในสถานที่ก่อสร้าง โดยใช้เครือข่ายใยประสาทเทียม (artificial neural network) ในการศึกษาลำดับต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

แบบสอบถาม และ การวิเคราะห์สมการถดถอย

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาจะเริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการเกิดของเสียภายในสถานที่ก่อสร้าง นำข้อมูลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมมาสร้างแบบสัมภาษณ์เพื่อไปสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องในการก่อสร้าง ต่อจากนั้นนำผลของแบบสัมภาษณ์มาแปรผลเป็นค่าคะแนนเพื่อเตรียมข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายใยประสาทเทียมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 4M กับการเกิดของเสียในสถานที่ก่อสร้าง

การสร้างแบบสำรวจข้อมูล

การสร้างแบบสำรวจข้อมูลในการศึกษานี้ ใช้ปัจจัยพื้นฐานในการก่อสร้าง 4 ประเภท ตามแนวคิด 4M ได้แก่ ปัจจัยมนุษย์ ปัจจัยด้านการจัดการ ปัจจัยวัสดุ และ ปัจจัยเครื่องจักร มาเป็นกรอบงานหลักในการพัฒนาแบบสำรวจข้อมูล กระบวนการสร้างแบบสำรวจสามารถแบบได้เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยเกิดของเสียในสถานที่ก่อสร้าง และแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

2. รวบรวมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดของเสียในสถานที่ก่อสร้าง และจัดหมวดหมู่

3. สรุปข้อมูลออกมาเป็นแบบสัมภาษณ์

หัวข้อแบบสำรวจ

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยเกิดของเสียในสถานที่ก่อสร้าง ผู้วิจัยได้สร้างแบบสัมภาษณ์โดยกำหนดหมวดหมู่ของปัจจัยที่อาจเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ข้อมูลจำนวนคนงาน

1. จำนวนของแรงงาน แบ่งออกเป็น เพศชายและเพศหญิง

2. ประเภทของแรงงาน แบ่งออกเป็น แรงงาน หัวหน้าแรงงาน, ผู้ควบคุมงาน, หัวหน้าผู้ควบคุมงาน, วิศกรภาคสนามหรือสถาปนิกภาคสนาม และ วิศวกรสำนักงานหรือสถาปนิกสำนักงาน

ข้อมูลที่เกี่ยวกับสาเหตุการเกิดขยะในสถานที่ก่อสร้าง

1. ปัจจัยด้านบุคคลากร (Man, M1)

1.1 การฝึกอบรมเกี่ยวกับการจัดการของเสีย

2.ด้านการจัดการ (Management, M2)

2.1 การใช้วิธีการก่อสร้างที่ทันสมัย เช่น ใช้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป (precast concrete system, ระบบโมดูลาร์ (modular system)

2.2 การใช้เทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในงานก่อสร้าง เช่น แบบจำลองสารสนเทศทางอาคาร (Building Information Model : BIM)

2.3 การกำหนดนโยบาย กฎเกณฑ์ และผู้ดูแลของการจัดการของเสียภายในสถานที่ก่อสร้าง

2.4 พื้นที่ในการจัดการของเสียในงานก่อสร้าง

2.5 การกำหนดนโยบายการนำชิ้นส่วนของวัสดุที่นำมาประกอบเพื่อเป็นแบบและเศษวัสดุที่เหลือจากการใช้ นำกลับมาใช้ใหม่ เช่น ไม้แบบ เศษเหล็ก

2.6 สถานที่จัดเก็บเหล็กเสริมกำลัง (Steel storage)

2.7 สถานที่จัดเก็บวัสดุและอุปกรณ์ (Material and equipment storage)

3 ปัจจัยด้านวัสดุ (Material, M3)

3.1 การจัดทำเอกสารการเบิกวัสดุจากสถานที่จัดเก็บอุปกรณ์ (store)

3.2 การประมาณการเกี่ยวกับปริมาณวัสดุที่ใช้ในการดำเนินการเพื่อป้องกันการจัดเก็บวัสดุเป็นเวลานาน

3.3 การตรวจคุณภาพวัสดุ

4. ปัจจัยด้านเครื่องจักรและเครื่องมือ (Machine& Equipment, M4)

4.1 การตรวจสอบเครื่องจักรตามวงรอบ

4.2 การตรวจสอบเครื่องมือก่อนการใช้งาน

การประมวลผลแบบสำรวจเป็นตัวเลข

การประมวลผลแบบสัมภาษณ์เป็นตัวเลขมีวัตถุประสงค์เพื่อนำข้อมูลจากการสำรวจไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของระบบเครือข่ายใยประสาทเทียม ตามภาพที่ 1

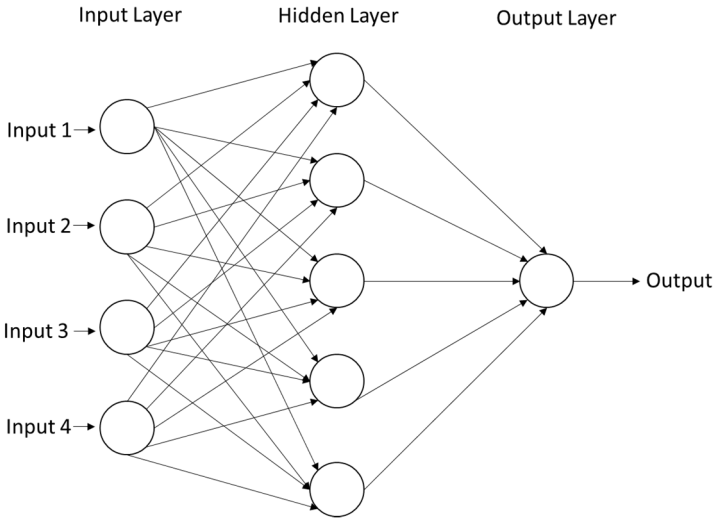


Figure 1 Artificial Neural Network

โดยกำหนดให้ปัจจัยทั้ง 4 มีค่าน้ำหนักเท่ากัน เท่ากับ 100 หน่วย การแบ่งระดับคะแนนในปัจจัยย่อยทำโดยการแบ่งสัดส่วนคะแนนแบบขั้นบันไดตามประสิทธิภาพในแต่ละหมวดของแบบสอบถาม ระดับค่าที่สูงหมายถึงปัจจัยดังกล่าวอาจมีความสัมพันธ์กับการเกิดของเสีย การศึกษาในครั้งนี้ใช้การประมวลผลด้วยค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักในกรณีที่ข้อมูลสำรวจมีการแจกแจงความถี่ กระบวนการแบ่งระดับขั้นของปัจจัยย่อย มีการอ้างอิงที่มาจากเอกสารและการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ปัจจัยด้านบุคคลากร (Man, M1) แบ่งเป็น 4 ระดับชั้น (มาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติ กระทรวงแรงงาน, 2555)

2. ด้านการจัดการ (Management, M2) แบ่งเป็น 4 ระดับชั้น อ้างอิงจากระดับวุฒิการใช้เทคโนโลยีการสร้างแบบจำลองข้อมูลอาคาร (Danny Mcgough, 2013)

3. ปัจจัยด้านวัสดุ (Material, M3) แบ่งเป็น 4 ระดับชั้น (Mohd Reza Esa et al.,2017)

4. ปัจจัยด้านเครื่องจักรและเครื่องมือ (Machine & Equipment, M4) แบ่งเป็น 4 ระดับชั้น (Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2015)

การให้คะแนนแบบค่าเฉลี่ยเลขคณิตถ่วงน้ำหนัก

การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตถ่วงน้ำหนักใช้ในกรณีที่ข้อมูลแต่ละค่ามีความสำคัญไม่เท่ากัน ถ้าใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตธรรมดา ที่ไม่มีการถ่วงน้ำหนักอาจทำให้ค่าเฉลี่ยที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{k} w_i x_i}{\sum_{i=1}^{k} x_i}$$

โดย $\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยเลขคณิตถ่วงน้ำหนัก

$\sum_{i=1}^{k} w_i x$ = ผลรวมของข้อมูล (x_i) คูณค่าน้ำหนัก (w_i)

$\sum_{i=1}^{k} x_i$ = ผลรวมของข้อมูล (x_i)

k = จำนวนชุดข้อมูล

Table 1 Example of calculation of weighted average values.

Classes of Labor	Weight rating (w_i)	Frequency (x_i)	$w_i x_i$
No experience	100	2	200
Class 1*	75	1	75
Class 2*	50	2	100
Class 3*	25	5	125
		$\sum_{xi} = 10$	$\sum w_i x_i = 500$

* According to Ministry of Labor (2012)

ตัวอย่างการคำนวณค่าเฉลี่ยเลขคณิตถ่วงน้ำหนักใน Table 1 มีค่าเท่ากับ $\frac{500}{10} = 50$ โดยตัวอย่างการให้คะแนนจากแบบสัมภาษณ์แสดงใน Table 2

Table 2 Sample of interview questions

You have policy and administrator of waste management in construction sites.	Ticking [✓] in relevant information to you	Score
Don't have policy		100
Have policy		75
Follow the policy	✓	50
Follow the policy and follow-up		25

ใน Table 2 กล่าวคือ หน่วยงานผู้ให้ข้อมูลมีการกำหนดนโยบาย กฎเกณฑ์ และผู้ดูแลของการจัดการของเสียภายในสถานที่ก่อสร้าง และมีการทำตามแต่ไม่ได้มีการทำอย่างเป็นรูปธรรม และปัจจัยนี้จึงได้ระดับคะแนน 50

การคำนวณการเกิดของเสียจากการก่อสร้าง

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้อนุมานถึงปริมาณการเกิดของเสียจากการก่อสร้าง จากส่วนต่างของข้อมูลรายการบันทึกการก่อสร้างจริงและรายการวัสดุเพื่อการประมาณราคา โดยนำข้อมูลดังกล่าวมาแปลงเป็นมูลค่าโดยอ้างอิงราคาต่อหน่วยจากสำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า (กระทรวงพาณิชย์,2560) จากนั้นจึงนำมาคิดเป็นสัดส่วนเพื่อกำจัดปัจจัยด้านเงินเฟ้อ และอัตราแลกเปลี่ยนและสกุลเงิน ของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างที่แสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนของส่วนต่างรายการบันทึกการก่อสร้างจริงและรายการวัสดุเพื่อการประมาณราคา

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการสัมภาษณ์ข้อมูลโครงการก่อสร้างจำนวน 3 โครงการ สามารถประมวลผลสัมภาษณ์ 3 ตอน ดังต่อไปนี้ ตอนที่ 1 คือแบบสำรวจข้อมูลพื้นฐานได้แก่ จำนวนของคนงาน เพศ ช่วงอายุ ประเภททักษะของแรงงาน และรวมถึงระดับวิศวกร สถาปนิก และ หัวหน้าผู้ควบคุมงาน ตอนที่ 2 คือศึกษาปัจจัยที่เป็นลักษณะเฉพาะของโครงการก่อสร้างได้แก่ ด้านมนุษย์ ด้านการจัดการ ด้านวัสดุ และ ด้านเครื่องจักร จากแบบสัมภาษณ์ เมื่อผ่านขั้นตอนการประมวลผลเป็นตัวเลข ได้ผลตาม Table 3 แสดงคะแนนตัวอย่างของสถานที่ก่อสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ยกกำลังสองของความสัมพันธ์ (R^2) กับปัจจัย 4M ที่อาจมีผลทำให้เกิดของเสียในสถานที่ก่อสร้าง โดย Table 4 แสดงอัตราส่วนของการเกิดของเสีย ระหว่างข้อมูลรายการบันทึกการก่อสร้างจริงและรายการวัสดุเพื่อการประมาณราคา และตอนที่ 3 คือ ผังจัดแสดงสิ่งปลูกสร้างภายในสถานที่ก่อสร้าง จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยด้านวัสดุมีผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Mohd Reza Esa et al.(2017) แต่ปัจจัยด้านการจัดการมีผลขัดแย้งกับการศึกษาของ Saheed O. Ajayi et al.(2017) อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานผลการศึกษาในปัจจัยด้านบุคคลากรและเครื่องจักร

Table 3 Score of 4M

Data	Site 1	Site 2	Site 3
Man	73.00	50.00	46.17
Management	36.00	51.75	34.00
Material	33.33	33.33	25.00
Machine	50.00	25.00	25.00

Table 4 Waste ratio

Data	Example 1	Example 2	Example 3
Waste	0.160	0.120	0.004

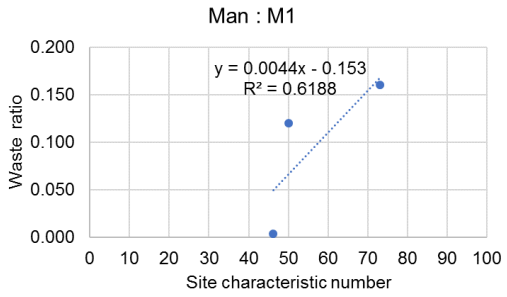


Figure 1 Correlation between M1- Waste

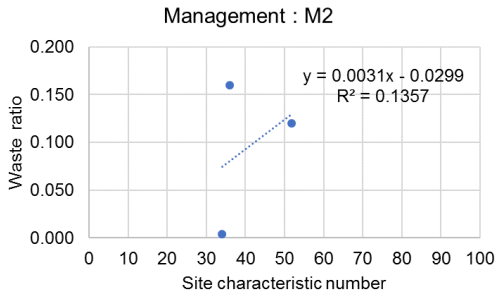


Figure 2 Correlation between M2- Waste

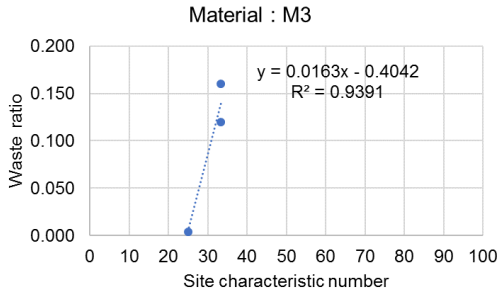


Figure 3 Correlation between M3- Waste

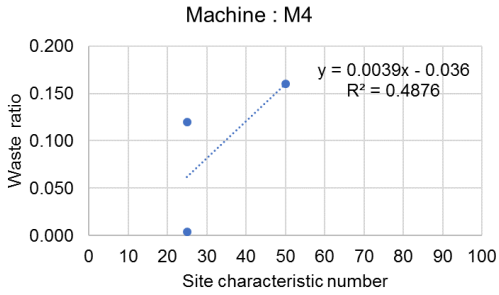


Figure 4 Correlation between M4- Waste

โดยอ้างอิงการแปรผลค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ยกกำลังสองของความสัมพันธ์ (R^2) ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2559) จาก Figure 1 มีค่าความสัมพันธ์กันระหว่างสองตัวแปรในระดับปานกลาง ระหว่างปัจจัยด้านบุคคลากรกับสัดส่วนของเสีย Figure 2 มีค่าความสัมพันธ์กันระหว่างสองตัวแปรในระดับต่ำ ระหว่างปัจจัยด้านการจัดการกับสัดส่วนของเสีย Figure 3 มีค่าความสัมพันธ์กันระหว่างสองตัวแปรในระดับต่ำ ระหว่างปัจจัยด้านวัสดุกับสัดส่วนของเสีย และ Figure 4 มีค่าความสัมพันธ์กันระหว่างสองตัวแปรในระดับปานกลาง ระหว่างปัจจัยด้านเครื่องจักรกับสัดส่วนของเสีย

สรุปผลและเสนอแนะ

ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง การเกิดของเสียในสถานที่ก่อสร้างและการวิเคราะห์การให้คะแนนของแต่ละข้อในการตอบแบบสัมภาษณ์ ของเสียที่เกิดขึ้นภายในสถานที่ก่อสร้างมีความสัมพันธ์กับวัสดุ แรงงาน เครื่องจักร และการจัดการ ที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยมีค่า R^2 ระหว่างปัจจัย M1 M2 M3 และ M4 เมื่อเทียบกับสัดส่วนการเกิดของเสีย มีค่าเท่ากับ 0.6188, 0.1357, 0.9391 และ 0.4876 ตามลำดับ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดของเสียในสถานที่ก่อสร้างมากที่สุดเกิดจากปัจจัยด้านวัสดุ จากนั้นจึงเป็นปัจจัยด้านมนุษย์และด้านเครื่องจักร โดยปัจจัยด้านการจัดการเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์น้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม การสำรวจข้อมูลมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น ข้อมูลมีความอ่อนไหวต่อบริษัท การได้กลุ่มตัวอย่างข้อมูลที่มีจำนวนปริมาณมากพอ จะทำให้ข้อมูลที่ผู้ศึกษามีความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้การศึกษานี้ยังไม่ครอบคลุมถึง

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัย การใช้แบบจำลองเพื่อพยากรณ์ข้อมูลที่มีปฏิสัมพันธ์มากกว่าปัจจัยเดี่ยว เช่น การใช้โครงข่ายใยประสาทเทียมอาจให้ผลการศึกษาที่มีความแม่นยำมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2559. **แผนแม่บทการบริหารจัดการขยะมูลฝอยของประเทศ (พ.ศ. 2559-2564)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท แอคทีฟพริ้นท์จำกัด, กรุงเทพฯ.

กระทรวงแรงงาน. 2555. **มาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติ**. แหล่งที่มา : http://lb.mol.go.th/main.php?filename=content01, 12 ตุลาคม 2560.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2559. **ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและการทำนายตัวแปร**. แหล่งที่มา : http://pioneer.chula.ac.th/~stosak/biostatlab/chapter10.pdf, 18 ตุลาคม 2560.

ประชาสรรณ์ แสนภักดี. 2547. **Ishikawa diagrams** แหล่งที่มา: http://www.prachasan.com/mindmapknowledge/fishbonemm.htm, 30 กันยายน 2560

สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์. 2560. **ราคาวัสดุสำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์**. แหล่งที่มา : http://www.price.moc.go.th/price/struct/index_new.asp, 1 ตุลาคม 2560.

Andrea Parisi Kern, Michele Ferreira Dias, Marlova Piva Kulakowski and Luciana Paulo Gomes. 2015. Waste generated in high-rise buildings construction: A quantification model based on statistical multiple regression. **Waste Management** 39: 35-44.

Danny Mcgough. 2013. **bim maturity levels**. แหล่งที่มา : http://www.architect-bim.com/what-is-bim-part-2-building-information-modelling-and-bim-maturity-levels/#.WjU5Yt9l-Uk, 15 ตุลาคม 2560.

Mohd Reza Esaa, Anthony Haloga and Lucia Rigamontic. 2017. Strategies for minimizing construction and demolition wastes in Malaysia. **Resources, Conservation and Recycling** 120: 219–229.

Saheed O. Ajayi, Lukumon O. Oyedele , Olugbenga O. Akinade , Muhammad Bilal ,Hafiz A. Alaka , HakeemA. Owolabi. 2017. Optimising material procurement for construction waste minimization: An exploration of success factors. **Sustainable Materials and Technologies** 11: 38–46

Technology Promotion Association (Thailand-Japan). 2015. **การซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน**. แหล่งที่มา : http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=1821&read=true&count=true, 18 ตุลาคม 2560.

การศึกษาความสึกหรอของล้อรถไฟแบบ Vidura ของการรถไฟแห่งประเทศไทย

Study of Wear of Vidura Railway Wheel Profile of State Railway of Thailand

รัชชานนท์ อภิญญายรรยง[1*] ธนา ภู่เผือกรัตน์[2] สิทธิพงษ์ พรหมลา[1] และ วิชัย ศิวะโกศิษฐ์[1]

Ratcharnon Apinyayanyong[1*], Thana Phuphuakrat[2], Sittipong Promla[1] and Wichai Siwakosit[1]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาลักษณะความสึกหรอของล้อรถไฟแบบ Vidura ของการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลการสึกหรอจริง จากการเดินรถโดยสารของการรถไฟแห่งประเทศไทยด้วยล้อรถไฟแบบ Vidura บนรางของการรถไฟแห่งประเทศไทยซึ่งเป็นรางหลากหลายชนิด และหลากหลายเส้นทาง จึงถือได้ว่าเป็นความสึกหรอเฉลี่ยของการเดินรถโดยสารของการรถไฟแห่งประเทศไทย ข้อมูลการสึกหรอถูกนำมาทำการวิเคราะห์และประมวลผลเพื่อแสดงพฤติกรรมการสึกหรอของล้อที่เกิดขึ้นที่พื้นล้อและบังใบล้อ และอัตราการสึกหรอของล้อ ผลจากการศึกษาพบว่า ลักษณะการสึกหรอมีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยพื้นล้อมีค่ากลางของอัตราการสึกหรอเชิงปริมาตรอยู่ที่ 7.613714 mm^3 ต่อกิโลเมตร ในขณะที่บังใบล้อ มีค่ากลางของอัตราการสึกหรอเชิงปริมาตรอยู่ที่ 1.47525 mm^3 ต่อกิโลเมตร

ABSTRACT

The study of wear characteristics of Vidura wheel profile of the State Railway of Thailand (SRT) with collected data from field measurements is presented. This study represents the average values of wheel wear due to normal utilizations of the wheel on multiple routes of SRT. The data has been analyzed for characters of tread wear and flange wear with volumetric wear rates. The results show that the wear characteristic is non-linear in nature, and the average value of volumetric tread wear rate is 7.613714 mm^3/km while the average value of volumetric flange wear rate is 1.47525 mm^3/km.

Key words: Railway, Railway Wheel, Worn Wheel

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

[1]ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

[1]KURAIL, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

[2]ศูนย์วิศวกรรมเครื่องกล การรถไฟแห่งประเทศไทย

[2]Mechanical Engineering Center, State Railway of Thailand

คำนำ

ในปัจจุบันการขนส่งทางรางถือได้ว่าเป็นคำตอบของปัญหาทางด้านการคมนาคม และการขนส่ง ในหลายๆด้าน ทั้งปัญหาการจราจรที่คับคลั่ง ปัญหาอุบัติเหตุในการเดินทางระยะไกล การสิ้นเปลืองเชื่อเพลิง รวมถึงการไม่สามารถเข้าถึงระบบขนส่งมวลชนของประชาชนที่มีภูมิลำเนาอยู่นอกเขตเมือง การสึกหรอของล้อรถไฟจึงถือเป็นผลจากการแก้ปัญหาทางด้านคมนาคม และขนส่งซึ่งเป็น ต้นเหตุของปัญหาอื่นๆ ที่จะตามมาอย่างมากมาย ทั้งในด้านความปลอดภัย ความสิ้นเปลือง และอื่นๆอีก มากมาย ดังนั้นการศึกษาความสึกหรอของล้อรถไฟจึงถือได้ว่าเป็นก้าวแรกของการแก้ปัญหาต่างๆ ที่ ต้นเหตุ และนำไปสู่การพัฒนาระบบคมนาคม และระบบขนส่งอย่างยั่งยืน

ล้อรถไฟที่การรถไฟแห่งประเทศไทยใช้ถูกปรับปรุงมุมของโคนบังใบโดยคุณหลวงวิฑูรวิธีกล เมื่อเดือนตุลาคม พ.ศ.2504 เพื่อให้มีความเหมาะสมกับสภาพทางในขณะนั้น ซึ่งทางการรถไฟเลือกใช้รางขนาด 50 ปอนด์ต่อหลา และแบบ 70 ปอนด์ต่อหลา รวมถึงรัศมีโค้งของทาง น้ำหนักบรรทุกต่อเพลา และกำลังขับของหัวจักรในขณะนั้น ทำให้การสึกหรอของล้อรถไฟแบบ Vidura ไม่สามารถใช้สถิติงานวิจัยจากต่างประเทศมาอ้างอิงได้

การศึกษาการสึกหรอของล้อรถไฟแบบ Vidura ครั้งนี้จะเป็นการวัดความสึกหรอของล้อตามระยะทางที่รถไฟได้ทำการวิ่ง เพื่อหาอัตราการสึกหรอของล้อรถไฟแบบ Vidura ที่วิ่งบนสภาพรางรถไฟต่างๆในประเทศไทย และทำขบวนโดยรถจักรชนิดต่างๆในประเทศไทย โดยถือค่าเบื้องต้นของการศึกหลอที่เกิดจากการใช้งานจริงที่ไม่สามารถกำหนดตัวแปรต่างๆ ได้ เช่น น้ำหนักบรรทุก เส้นทาง สภาพทาง ความเร็ว สภาพอากาศ

อุปกรณ์และวิธีการ

การวัดล้อรถไฟโดยเครื่อง YOSHIDA SEIKI TS-3D

การวัดล้อรถไฟโดยเครื่อง YOSHIDA SEIKI TS-3D จะได้โปรไฟล์ล้อรถไฟ ออกมาบนกระดาษ จากนั้นจึงนำโปรไฟล์ล้อรถไฟที่ได้นั้น แสกนเป็นรูปภาพแบบดิจิตอล ซึ่งการวัดล้อเพื่อใช้ในการศึกษาจะทำการวัดล้อทั้งแปดล้อในตู้ที่ทำการศึกษา เพื่อหาค่าเฉลี่ยของการสึกหรอ เนื่องจากการเดินรถไฟในปัจจุบันไม่มีการกลับรถ จะเป็นการเดินรถสวนทางกลับในเส้นทางเดิม โดยการเปลี่ยนตำแหน่งหัวรถจักร และรถที่ศึกษาไม่สามารถกำหนดเส้นทางการวิ่งได้ จึงถือว่าเป็นการวิ่งแบบเฉลี่ยเส้นทางของการรถไฟแห่งประเทศไทย อ้างอิงตามกิโลเมตรที่ทำการวิ่ง

การวัดพิกัดการสึกของล้อรถไฟโดย GO-NO GO Gauge

การวัดพิกัดการสึกของล้อรถไฟโดย GO-NO GO Gauge หรือเครื่องมือวัดแบบวิฑูรของการรถไฟแห่งประเทศไทยนั้น จะได้ระยะพิกัดสึกของ พื้นล้อ บังใบ โคนบังใบ และความหนาของล้อ ในหน่วยมิลิเมตร เพื่อใช้ในการตรวจสอบยืนยันความถูกต้องของโปรไฟล์ของล้อที่ได้มาจากการวัดโดยเครื่อง YOSHIDA SEIKI TS-3D

การสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม Solidworks

เมื่อได้รูปภาพแบบดิจิตอลแล้ว จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองเสมือนจริง สามมิติ บนโปรแกรม SolidWorks เพื่อหาปริมาตรของล้อ โดยฟังก์ชันการคำนวณปริมาตรของรูปจำลองสามมิติภายในโปรแกรม และนำมาเปรียบเทียบกับล้ออื่นๆ โดยใช้ระยะทางวิ่ง (กิโลเมตร) เป็นหลักอ้างอิงในการเปรียบเทียบ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่า ล้อรถไฟแบบ Vidura เกิดการสึกหรอแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีอัตราที่ไม่คงที่ เมื่อนำโปรไฟล์ล้อแต่ละล้อมาเปรียบเทียบกันทำให้สามารถเห็นการสึกหรอของล้อได้อย่างชัดเจน ซึ่งการสึกหรอของล้อที่สนใจ สามารถแบ่งออกเป็นสองชนิด ซึ่งเกิดคนละบริเวณ และคนละสาเหตุกัน คือการสึกหรอที่พื้นล้อซึ่งเกินจากการเสียดสีของพื้นล้อกับหัวราง และการสึกหรอที่เกิดจากการลงห้ามล้อที่พื้นล้อเป็นหลัก อีกบริเวณหนึ่งคือการสึกหรอบริเวณบังใบซึ่งเกิดจากการที่บังใบเสียดสีกับสันรางด้านใน บนรางด้านนอกของโค้ง ขณะที่รถไฟทำการเข้าโค้ง ซึ่งแรงที่บังใบกระทำกับสันรางด้านใน จะแปรผกผันกับรัศมีของโค้งนั้นๆ ซึ่งตัวอย่างของการสึกหรอได้แสดงไว้ดังรูปที่ 1 และ รูปที่ 2

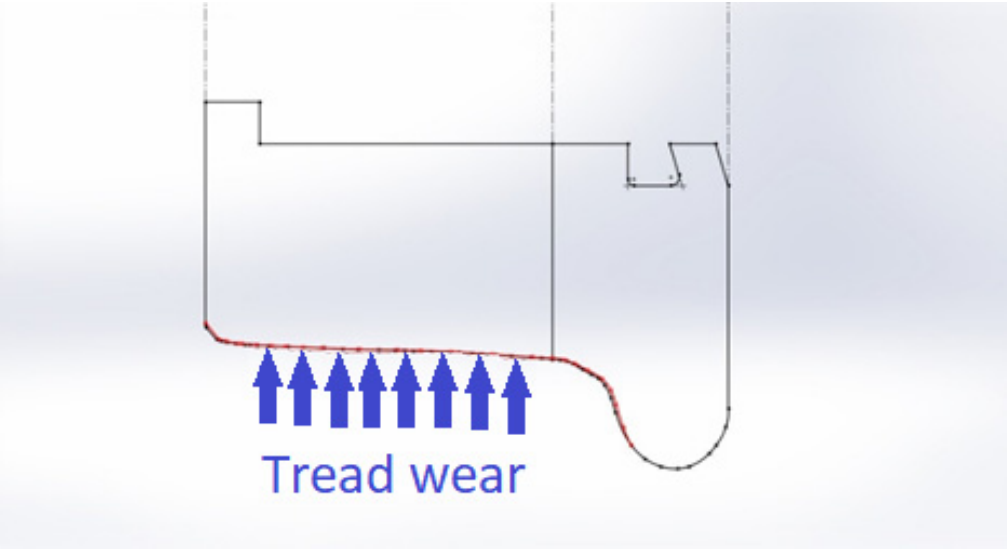


Figure 1 Example of Tread wear

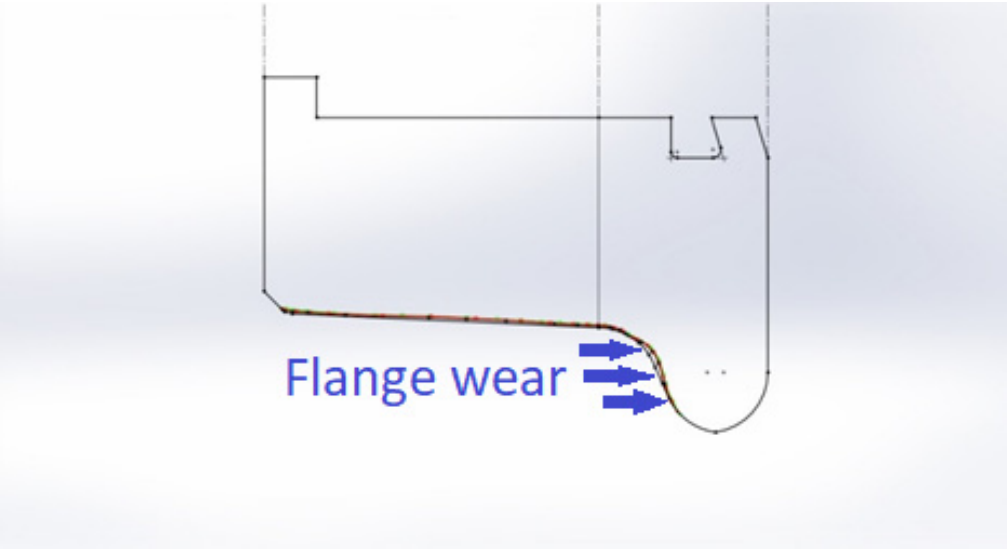


Figure 2 Example of Flange wear

ข้อมูลรูปทรงของล้อที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นล้อที่มีการใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยมีการตรวจสอบ จากเครื่องมือวัดแบบวิซูรของการรถไฟแห่งประเทศไทย และมีพิกัดต่างๆ ตามเกณฑ์ความปลอดภัย จาก นั้นจึงนำโปรไฟล์ล้อมาสร้างเป็นแบบจำลองเสมือนจริงแบบสามมิติเพื่อหาปริมาตรของล้อที่กิโลเมตรต่างๆ และทำการเปรียบเทียบกันและหาค่ากลาง ได้กราฟแสดงการปริมาตรของล้อตามระยะทางดังรูปที่ 3 และ รูปที่ 4

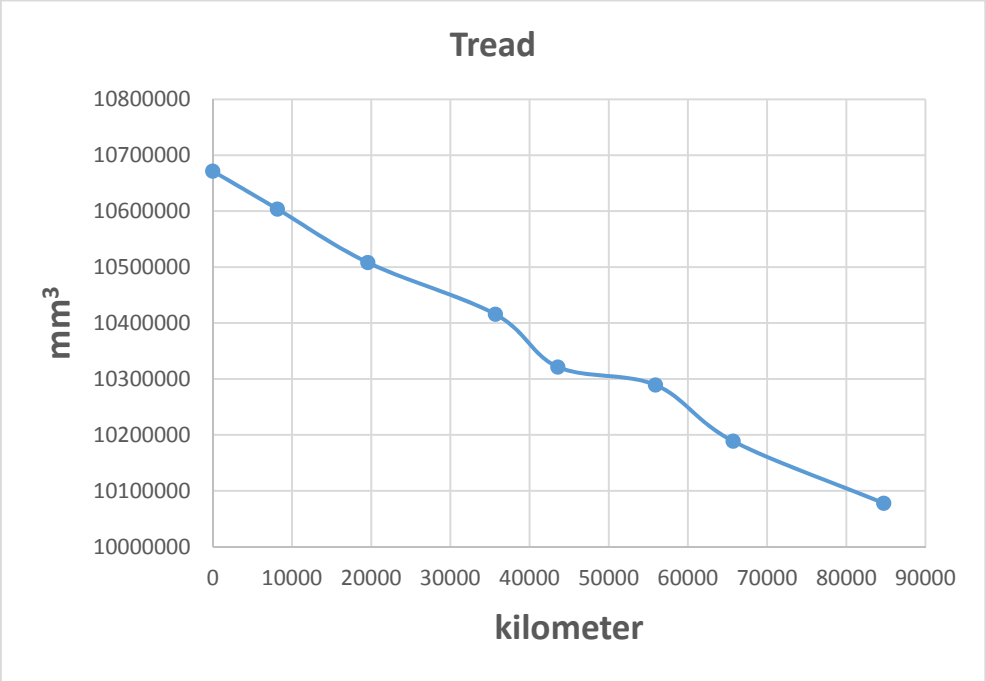


Figure 3 Tread wear of Vidura wheel profile by volume

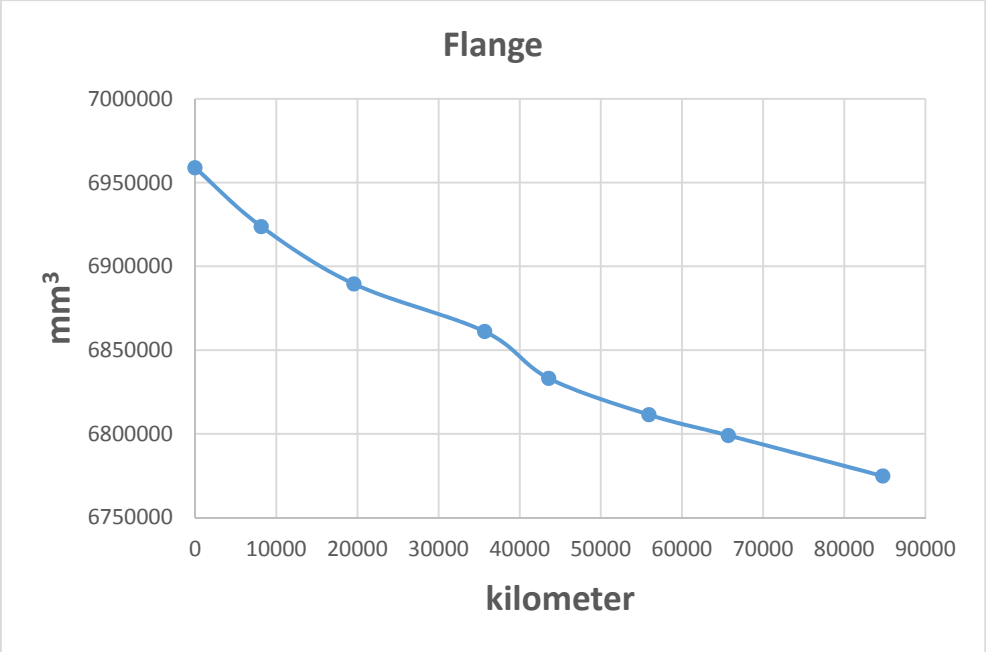


Figure 4 Flange wear of Vidura wheel profile by volume

จากข้อมูลพบว่าอัตราการสึกหรอเชิงปริมาตรโดยเฉลี่ยตลอดระยะการเดินรถมีค่าเท่ากับ 7.00779451 mm^3 ต่อกิโลเมตรที่พื้นล้อ และ 2.17265126 mm^3 ต่อกิโลเมตรที่บังใบล้อ

จากนั้นจึงนำค่ากลางที่ได้มาวิเคราะห์หาอัตราการสึกหรอเชิงปริมาตรของล้อรถไฟและแสดงการสึกหรอของล้อรถไฟได้ตามรูปที่ 5 และรูปที่ 6

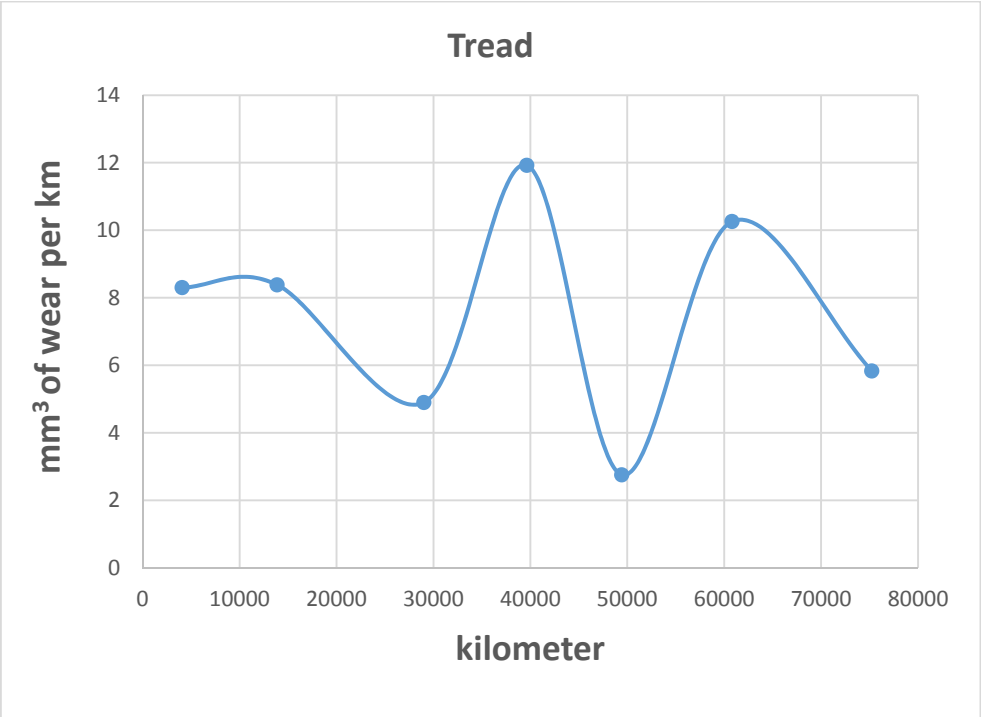


Figure 5 Tread wear rate by volume

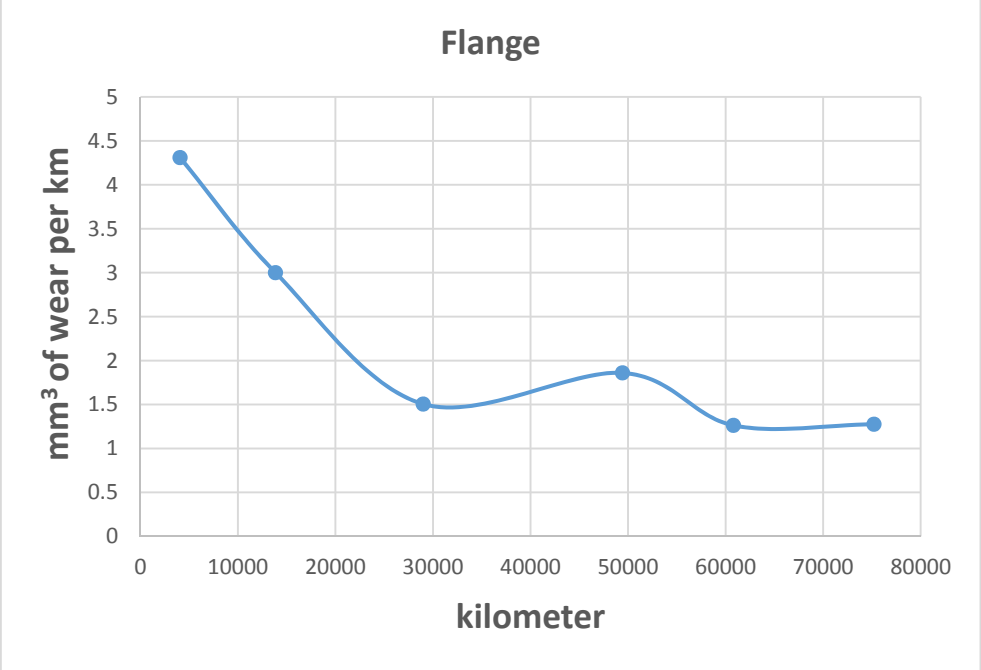


Figure 6 Flange wear rate by volume

จากรูปที่ 5 และ 6 พบว่าอัตราการสึกหรอบริเวณพื้นล้อมีความแปรปรวนอย่างมาก ไม่สามารถสรุปนัยสำคัญ หรือทำนายอัตราการสึกหรอได้ อันเป็นผลมาจากการสึกหรอบริเวณพื้นล้อมีสาเหตุหลักในการสึกหรอถึงสองสาเหตุ คือการเสียดสีระหว่างพื้นล้อและราง ขณะรถไฟทำการวิ่ง ซึ่งเราสามารถควบคุมปัจจัยในการสึกดังกล่าวได้ โดยการแบ่งช่วงการสึกหรอ และเฉลี่ยการสึกหรอในช่วงนั้นๆ ออกตามระยะทางที่รถได้ทำการวิ่ง ส่วนอีกสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณพื้นล้อก็คือ การลงห้ามล้อที่บริเวณพื้นล้อซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ทั้งพื้นที่หน้าสัมผัสในการลงพื้นล้อ ความแรงในการลงพื้นล้อ รวมถึงความถี่ และระยะเวลาต่อครั้งในการลงพื้นล้อ โดยที่มีค่ากลางของอัตราการสึกหรออยู่ที่ 7.613714 mm^3 ต่อกิโลเมตร มีค่าความแปรปรวน 9.43093 mm^3 ต่อกิโลเมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 3.07098 mm^3 ต่อกิโลเมตร

ส่วนอัตราการสึกบริเวณบังใบจะเห็นได้ชัดว่าอัตราการสึกหรอลดลงตามระยะกิโลเมตรที่วิ่งอย่างมีนัยสำคัญ ในช่วงสามหมื่นกิโลเมตรแรกโดยมีอัตราลดลงที่ 0.9359 mm^3 ต่อกิโลเมตร ต่อหมื่นกิโลเมตรที่วิ่งในช่วง 4.309 mm^3 ต่อกิโลเมตร ถึง 1.505 mm^3 ต่อกิโลเมตร ส่วนช่วงหลังสามหมื่นกิโลเมตรไปแล้วนั้นมีความแปรปรวนเล็กน้อย มีค่ากลางอยู่ที่ 1.47525 mm^3 ต่อกิโลเมตร ค่าความแปรปรวน 0.07814 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.27954 mm^3 ต่อกิโลเมตร ซึ่งอาจเกิดจากการที่ระยะห่างระหว่างบังใบและสันรางที่มากขึ้นจากการใช้งานในช่วงแรก ทำให้ลดโอกาสที่บังใบล้อจะสัมผัสกับสันรางลงในขณะที่วิ่งในทางโค้ง และทำให้อัตราการสึกหรอลดลงไปด้วย

สรุป

การศึกษาการสึกหรอของล้อรถไฟแบบ Vidura ของการรถไฟแห่งประเทศไทย สามารถแสดงการสึกหรอเชิงปริมาตร และอัตราการสึกหรอเชิงปริมาตรต่อระยะทางการให้บริการของรถไฟ โดยลักษณะการสึกหรอเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นทั้งบริเวณพื้นล้อและบังใบล้อ การสึกหรอที่พื้นล้อมีความแปรปรวนสูง ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยที่เกิดขึ้นนอกจากสัมผัสกันระหว่างล้อและราง ในขณะที่อัตราการสึกหรอที่บังใบล้อ มีค่าสูงในช่วงต้นของการใช้งานและมีค่าที่ลดลงซึ่งอาจเกิดจากโอกาสที่บังใบล้อจะสัมผัสกับสันรางลดลงในทางโค้ง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ 1. ศูนย์วิศวกรรมเครื่องกล การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ อบรมวิธีการใช้เครื่องมือ และ ความปลอดภัยในการใช้งาน 2. ศูนย์ซ่อมรถโดยสารกรุงเทพ การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่อนุเคราะห์ข้อมูลการเดินรถ และ 3. หน่วยเดินรถโดยสารแขวงกรุงเทพ การรถไฟแห่ประเทศไทย ที่กรุณาจัดการการเก็บข้อมูล และควบคุมความปลอดภัยในขณะทำการเก็บข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

Thana Phuphuakrat, Kummun Chooprasерd, Wichai Siwakosin. 2015. **Preliminary Consideration of a Wheel- Rail Interaction of the Vidura Wheel Profile and BS 100A Rail Profile to Lateral Dynamic of an SRTWheelset on a Meter Gauge Straight Track**.TRAS2015-2

Thana Phuphuakrat, Kitipath Chaksoong, Kummun Chooprasерd, Wichai Siwakosin. 2015. **Effects of Wheel- Rail Interactions of the Unworn and Worn SRT Vidura Wheel Profiles and a BS 100A Rail Profile to the Tangent Track Wheelset Lateral Dynamic and Wear Indexes**. TRAS2016

Kitipath Chaksoong, Kummun Chooprasерd, Thana Phuphuakrat, Wichai Siwakosin. 2016. **The study of critical speeds from dynamical responses of Vidura contour train wheel set with BS100 rail profile on meter gauge track of the State Railway of Thailand**. ME-NETT 2016

SRT Mechanical Engineer Center. 1962. **Memo on Vidura Contour**. State Railway of Thailand. Bangkok, Thailand.

SRT Mechanical Engineer Center. **Vidura Wheel Profiles Drawing**. State Railway of Thailand. Bangkok, Thailand.

Wichai Siwakosin. 2016. **Rolling Stock Technology : Introduction to Vehicle Dynamics**. KURAIL. Kasetsart University.

การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีต่อระบบไฟฟ้า

Impact Study on Harmonics From Industrial Factory to Power Systems

ณัฐพงษ์ สินประกอบ[1*] และ กฤติเดช บัวใหญ่[1]

Nutthaphong Sinpragob[1*] and Krittidet Buayai[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีต่อระบบไฟฟ้า อันเนื่องมาจากการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นในระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า กรณีศึกษาของ บริษัท เอี่ยมเฮง โมดิฟาย สตาร์ช จำกัด เป็นโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ตั้งอยู่ในพื้นที่ อำเภอเสิงสาง จังหวัดนครราชสีมา โดยทำการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าในโรงงาน ตามมาตรฐาน EN50160, ทำการประเมินผลระดับของฮาร์มอนิกส์ ตามมาตรฐาน IEEE 519/1992 และตามข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม PRC-PQG-01/1998 ของคณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อสรุปผลการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าและค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในโรงงาน เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในโรงงาน

ABSTRACT

This research aims to investigate on impact of harmonics caused by non-linear load which operates in industrial factory. The research has selected factory of Eiamheng Modified Starch Company Limited for a case study. This factory produces tapioca flour and located in Soeng Sang district, Nakhonratchasima province. An investigation in this research will start for measurement power quality by EN50160 standard. Then, analysis and guideline are IEEE 519/1992 standard and PRC-PQG-01/1998 regulation, power system reliability committee of MEA, EGAT, PEA. The result of this study will present total harmonics distortion voltage (THDv) in term of power quality and improvement method.

Key Words: harmonics, standard of EN50160, standard of IEEE 519/1992, standard of PRC-PQG-01/1998

*Corresponding author; e-mail address: nutthaphong.si@rmuti.ac.th

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima 30000.

คำนำ

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ กฟภ. เป็นหน่วยงานที่ให้บริการด้านพลังงานไฟฟ้าแก่ธุรกิจอุตสาหกรรมและครัวเรือน ในพื้นที่ให้บริการครอบคลุม 74 จังหวัดทั่วประเทศ เพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดความมั่นใจในการใช้พลังงานไฟฟ้า ตอบสนองความต้องการและสร้างความพึงพอใจสูงสุดให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าในภาคโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าให้แก่โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เพื่อลดปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้า อันได้แก่ ไฟฟ้าตก ไฟฟ้ากระพริบ ไฟฟ้าดับ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อุปกรณ์หรือเครื่องจักรภายในโรงงานเสียหายหรือหยุดการทำงาน ส่งผลกระทบแก่ผู้ใช้ไฟฟ้า

ปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน มีการใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีที่สูงขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดไม่เป็นเชิงเส้น อาทิเช่น อุปกรณ์ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็ว, ชุดโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์, ชุดคอมพิวเตอร์, ชุดควบคุมไทริสเตอร์, ตัวเรียงกระแส, เตาหลอมแบบอาร์ค, เครื่องเชื่อมแบบสปอต เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ที่กล่าวมานี้ล้วนเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ ซึ่งฮาร์มอนิกส์จะไหลอยู่ในระบบไฟฟ้าส่งผลให้เกิดปัญหาแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าเองหรือของผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆ ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงและอาจสร้างปัญหาให้แก่ อุปกรณ์ไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ฮาร์มอนิกส์ คือ สัญญาณรูปคลื่นไซน์ ที่มีความถี่แตกต่างไปจากความถี่มูลฐาน สำหรับประเทศไทยเท่ากับ 50 Hz เช่น ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2 จะมีค่าความถี่เท่ากับ 100 Hz หรือ ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 จะมีค่าความถี่เท่ากับ 150 Hz เป็นต้น ผลรวมของฮาร์มอนิกส์ทั้งขนาดและมุมเฟสที่ลำดับต่างๆ รวมกับรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่มูลฐานจะมีผลทำให้รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากเดิม และเมื่อกระแสไฟฟ้านี้ไหลผ่านค่าอิมพีแดนซ์ในระบบไฟฟ้า ก็จะทำให้รูปคลื่นแรงดันมีลักษณะผิดเพี้ยนไปด้วย ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เกิดความสูญเสียขณะจ่ายโหลดและเกิดความร้อนสะสมภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้อายุการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าสั้นลง, เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ ภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ตัวเก็บประจุกำลังสำหรับปรับปรุงตัวประกอบกำลังซึ่งจะทำให้เกิดการขยายขนาดของแรงดันและกระแสสูงเกินค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ ทำให้ ฟิวส์ หรือ ตัวเก็บประจุชำรุดเสียหาย (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2558)

ปัจจุบัน กฟภ. มีเครื่องมือที่ทันสมัยสำหรับตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าในโรงงาน ทำให้ทราบถึงความผิดปกติของระบบไฟฟ้าภายในโรงงาน จะช่วยให้มีการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

สภาพปัญหาของโรงงาน

บริษัท เอี่ยมเฮง โมดิฟาย สตาร์ช จำกัด เป็นโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ตั้งอยู่ในพื้นที่ อำเภอเสิงสาง จังหวัดนครราชสีมา เครื่องจักรภายในโรงงานส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้า โดยมีอุปกรณ์ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็ว หรือ Inverter ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งปัญหาทางด้านระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโรงงาน คือ คาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าทางด้านแรงดันต่ำของโรงงานมีการระเบิดชำรุดอยู่เป็นประจำ และฟิวส์ป้องกันทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าในโรงงานมีการระเบิดอยู่บ่อยครั้ง ส่งผลให้ไฟฟ้า

ภายในโรงงานดับทำให้ไม่สามารถเดินเครื่องจักรได้อย่างต่อเนื่อง กฟภ. จึงได้ดำเนินการตรวจวัดระดับคุณภาพไฟฟ้าภายในโรงงานเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาดังกล่าว

เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า รุ่น PowerXplorer™ PX5 เป็นผลิตภัณฑ์จาก Dranetz-BMI ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านคุณภาพไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์และการรบกวนต่างๆ ในระบบไฟฟ้าและยังถูกออกแบบมาให้ทำการวิเคราะห์ทางด้านสถิติซึ่งเรียกว่า Quality of Supply โดยเป็นการตรวจวัดและตั้งค่าเพื่อประเมินตามมาตรฐาน EN50160 ซึ่งเป็นมาตรฐานของยุโรป (Dranetz, 2004)

วิธีการตรวจวัดระดับคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN50160

การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า จะทำการวัดค่าไฟฟ้าในระบบจำหน่ายทางด้านแรงดันต่ำ โดยติดตั้งอุปกรณ์เครื่องวัดไว้ภายในตู้ควบคุมไฟฟ้า Main Distribution Board (MDB) ทางด้านแรงต่ำ โดยใช้สายวัดของอุปกรณ์เครื่องวัด เข้าที่ชุดมิเตอร์วัดไฟฟ้าของตู้ควบคุมไฟฟ้า เพื่อนำค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากโรงงานไปประมวลผลในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

ในการตรวจวัดระดับคุณภาพไฟฟ้าของโรงงาน จะทำการวัดค่าทางไฟฟ้าที่ต้องตรวจวัดเพื่อใช้ประเมินตามมาตรฐาน EN50160 (Cenelec, 2005) ดังแสดงใน Table 1

No	quality electricity level	period of measurement per times	minimum of period in data saving
1	Voltage	10 minute	1 week
2	Frequency	10 minute	1 week
3	Voltage Unbalance	10 minute	1 week
4	Voltage Fluctuations	Pst : 10 minute Plt : 120 minute	1 week
5	Power Factor	10 minute	1 week
6	Harmonics	10 minute	1 week

Table 1 The measurement of power quality by EN50160 standard

การประเมินผลการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN50160 เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าจะบันทึกค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าทุกๆ 10 นาที โดยมีระยะเวลาการตรวจวัดไม่ต่ำกว่า 1 สัปดาห์ หรือ 1 รอบการทำงานของโรงงาน โดยเมื่อได้ข้อมูลการตรวจวัดแล้ว จะต้องทำการเรียงข้อมูลจากค่าที่น้อยที่สุดไปหาค่าที่มากที่สุด ซึ่งเกณฑ์การประเมินจะใช้ค่าที่ 95% ของแรงดันไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ทั้งหมดเป็นค่าตัวแทนของแรงดันไฟฟ้า ณ จุดตรวจวัด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการตรวจวัดและประเมินคุณภาพไฟฟ้า

ผลการตรวจวัดและประเมินคุณภาพไฟฟ้าของโรงงาน ตามมาตรฐาน EN50160 (Cenelec, 2005) แสดงใน Table 2

1. Voltage Variation	Phase	Line-Line Voltage (V_{pp})					Assessment
		Minimum (Volt)	Average (Volt)	Maximum (Volt)	Valuation (Volt)	PEA.Standard According to EN50160 Std.	
	AB	383	401	422	413	380 V± 10% (342 – 418V)	pass
	BC	381	399	420	411		
	CA	380	398	420	410		
2. Voltage Unbalance	Phase	Voltage Unbalance (%Ub)					Assessment
		Minimum (%)	Average (%)	Maximum (%)	Valuation (%)	PEA. Standard According to EN50160 Std.	
	3-Phase	0.078	0.461	0.579	0.561	< 2.0 %	pass
3. Power Factor	Phase	Power Factor(PF.)					Assessment
		Minimum	Average	Maximum	Valuation	PEA. Standard	
	3-Phase	0.814	0.942	0.998	0.952	0.85L – 1.0	pass
4. Voltage Flicker	Phase	Short term severity value Flicker: Pst					Assessment
		Minimum (%)	Average (%)	Maximum (%)	Valuation (%)	PEA. Standard According to PRC-PQG-01/1998	
	A	0.090	0.305	0.421	0.376	Pst < 1.0	pass
	B	0.093	0.322	0.446	0.396		
	C	0.089	0.310	0.423	0.391		
	Phase	Long term severity value Flicker: Plt					Assessment
		Minimum	Average	Maximum	Valuation	PEA. Standard According to PRC-PQG-02/1998	
	A	0.137	0.311	0.387	0.364	Plt < 0.8	pass
	B	0.150	0.327	0.403	0.382		
	C	0.144	0.317	0.465	0.373		
5. Power Frequency	Phase	Power Frequency(Hz)					Assessment
		Minimum	Average	Maximum	Valuation	PEA. Standard According to PRC-PQG-01/1998	
	3-Phase	49.91	50	50.09	50.04	50 Hz ± 1% (49.5-50.5 Hz)	pass

Table 2 Result of the measurement of power quality of a factory

จากการวัดค่าคุณภาพไฟฟ้าของโรงงาน พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้า ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด, ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด, ค่าตัวประกอบกำลัง ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด, แรงดันกระเพื่อม ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด และ ค่าความถี่ไฟฟ้า ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด

ในส่วนผลการประเมินฮาร์มอนิก ตามมาตรฐาน IEEE 519/1992 (IEEE, 1993) และตามข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม PRC-PQG-01/1998 (คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, 2541) วัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม Total Harmonics Distortion Voltage (%THDv) ในโรงงาน ดังแสดงใน Table 3

Voltage Harmonics Distortion ($\%THD_V$)	Phase	Total Harmonics Distortion Voltage (%THDv)					Assessment
		Minimum (%)	Average (%)	Maximum (%)	Valuation (%)	PEA. Standard According to IEEE519/1992 Std.	
	A	2.565	6.354	7.463	7.205	< 5 %	Not pass
	B	2.443	5.594	6.683	6.433		
	C	2.203	5.336	6.354	6.129		
	N	-	-	-	-		

Table 3 Result of total harmonics distortion voltage (%THDv)

จะเห็นว่าค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม ในเฟส A, เฟส B และเฟส C มีค่าไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด และเมื่อแยกการเกิดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม โดยแสดงค่าแยกในแต่ละลำดับ พบว่าในลำดับที่ 5 มีค่าเท่ากับ 5.085 และลำดับที่ 11 มีค่าเท่ากับ 4.054 ซึ่งมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ดังแสดงใน Table 4

Order of harmonic	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Requirements 0.400 kV (%)	2	4	2	4	2	4	2	4	2
Valuation 0.400 kV (%)	0.060	0.404	0.049	5.085	0.056	2.121	0.065	1.045	0.075
Assessment	pass	pass	pass	Not pass	pass	pass	pass	pass	pass
Order of harmonic	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Requirements 0.400 kV (%)	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Valuation 0.400 kV (%)	4.054	0.092	3.817	0.084	1.609	0.070	1.313	0.056	1.807
Assessment	Not pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass

Table 4 Result of harmonic distortion voltage

เมื่อนำค่ามาแสดงทั้งแรงดัน เฟส A, เฟส B และ เฟส C เป็นรูปกราฟ ดังใน Figure 1 เป็นการแสดงค่าบางช่วงในการตรวจวัดค่าฮาร์มอนิกส์ในโรงงาน พบว่าแรงดันฮาร์มอนิก ในลำดับที่ 5 และลำดับที่ 11 มีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าที่สูงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า คือ

1.ส่งผลกระทบให้อุปกรณ์ที่อยู่ในจุดต่อร่วมเดียวกัน ได้รับปัญหาฮาร์มอนิก

2.ทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของ กฟภ. ในลำดับที่ 5 และลำดับที่ 11 สูงขึ้น

3.เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ ในลำดับดังกล่าว ทำให้เกิดการขยายขนาดของแรงดันและกระแสสูงเกินค่าพิกัดของตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าและเกินพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าของโรงงานส่งผลให้เกิดการระเบิดชำรุดเสียหาย

สาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก ในลำดับที่ 5 และลำดับที่ 11 ในโรงงานสูงเกินมาตรฐานนั้น เกิดจากการเพิ่มไลน์การผลิตของโรงงานโดยมีอุปกรณ์ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็ว หรือ Inverter ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น และเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ ในฮาร์มอนิกลำดับดังกล่าว

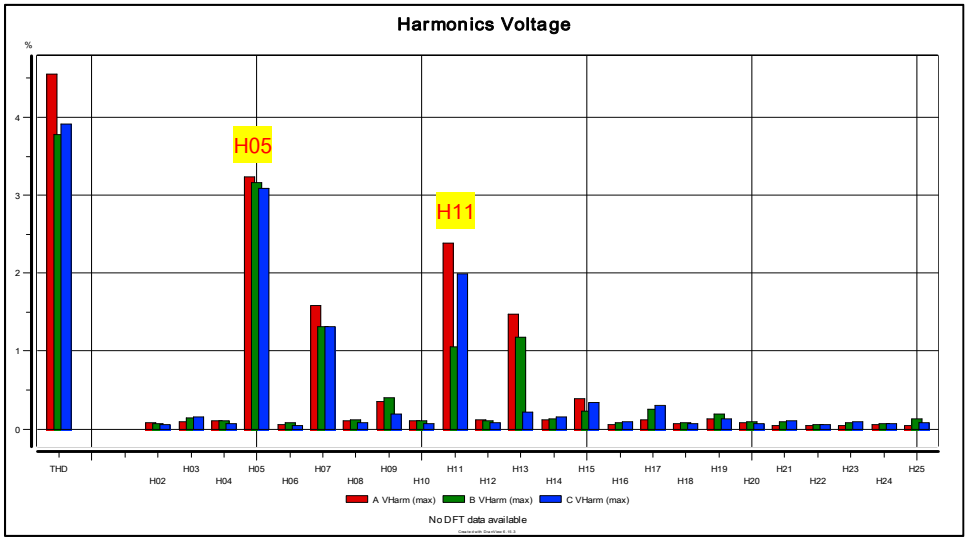


Figure 1 %THDv of harmonic order

สรุปผลการตรวจวัดวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าและระดับฮาร์มอนิกส์ในโรงงานพบว่าค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (%THDv) ของโรงงาน มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งจะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่ออยู่ในจุดต่อร่วมเดียวกัน เป็นผลทำให้เกิดความร้อนสูงกว่าปกติในอุปกรณ์ไฟฟ้ารวมถึงสายไฟ และอาจจะเกิดปัญหาสภาวะรีโซแนนซ์ ส่งผลทำให้เกิดการชำรุดเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในโรงงานได้

ภายใต้สภาวะที่ระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกส์เจือปนอยู่ ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงจะมีสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม อันเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ Skin Effect และ Proximity Effect ที่กระแสฮาร์มอนิกส์สร้างขึ้น ซึ่งจะทำให้กระแสส่วนใหญ่ที่ไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สามารถไหลได้เต็มพื้นที่หน้าตัดของขดลวดได้ ทำให้เกิดความร้อนสูงผิดปกติในตัวหม้อแปลง และไม่สามารถใช้งานหม้อแปลงได้เต็มพิกัด โรงงานควรระมัดระวังหากจะมีการเพิ่มปริมาณโหลดในอนาคต และควรเลือกหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด K-Factor Rating ซึ่งออกแบบโดยใช้ขดลวดแบบ Stranded Conductor แทนการใช้ขดลวดแบบ Solid Conductor หม้อแปลงไฟฟ้าจะสามารถทนความร้อนได้สูงขึ้นเมื่อถูกนำไปใช้งานอยู่ในระบบไฟฟ้าที่มีกระแสฮาร์มอนิกส์เจือปน

โรงงานควรให้มีการเพิ่มขนาดพิกัดของอุปกรณ์ให้สูงขึ้น เช่น ขนาดสายใหญ่ขึ้น เพิ่มพิกัดแรงดันการใช้งานของ Capacitor Bank สูงขึ้น เพื่อลดปัญหาความร้อนจากปรากฏการณ์ Skin Effect และ Proximity Effect ที่กระแสฮาร์มอนิกส์สร้างขึ้น และควรติดตั้ง Harmonic Filter เพื่อป้องกันการเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ซึ่งจะส่งผลต่อชุดควบคุม Capacitor Bank เกิดการระเบิดและชำรุดเสียหาย

สรุป

การตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าในโรงงาน เพื่อวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าและระดับของฮาร์มอนิกส์ในโรงงาน ตามมาตรฐาน EN50160 ซึ่งจะใช้เครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้าแรงต่ำ ทุกๆ 10 นาที โดยมีระยะเวลาการตรวจวัดค่าต่อเนื่องอย่างน้อย 7 วัน จากการวัดค่าคุณภาพไฟฟ้าของโรงงาน ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า, ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล, ค่าตัวประกอบกำลัง, แรงดันกระเพื่อม, ค่าความถี่ไฟฟ้า และค่าฮาร์มอนิก ทำให้เราทราบค่าคุณภาพไฟฟ้าทุกค่าเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในโรงงาน จากข้อมูลพบว่าค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก ในลำดับที่ 5 และลำดับที่ 11 ในโรงงานสูงเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ส่งผลให้เกิดปัญหา คือ ตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าของโรงงานชำรุด และฟิวส์ป้องกันหม้อแปลงของโรงงานระเบิดเสียหายบ่อยครั้ง เนื่องจากเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ในฮาร์มอนิกลำดับดังกล่าว การแก้ไขและลดปัญหาดังกล่าวนั้น โรงงานควรติดตั้ง Harmonic Filter เพื่อป้องกันการเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ ในฮาร์มอนิก ลำดับที่ 5 และลำดับที่ 11 จากผลการวิเคราะห์ทางคณะผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาและออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้ Harmonic Filter ในการแก้ปัญหาดังกล่าวต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา ทุกท่านที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนในแขนงวิชาต่างๆ และสนับสนุนการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2558. **คู่มือถามตอบปัญหาเทคนิคด้านคุณภาพไฟฟ้าอุตสาหกรรม**. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต3 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) จังหวัดนครราชสีมา.

Dranetz. 2004. **PowerXplorer™ PX5 manual**. 1000 New Durham Road, Edison, New Jersey 08818-4019 USA.

Cenelec. 2005. **European Committee for Electrotechnical Standardization - EN50160**. 17 Avenue Marnix B-1000 Brussels.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1993. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems : IEEE 519-1992**. 345 East 47th Street,New York,NY 10017,USA.

คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า. 2541. **ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิก เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม** PRC-PQG-01/1998 **ของคณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค**.

การประเมินความเสี่ยงจากกระบวนการทำลายอุปกรณ์ของถุงลมและเข็มขัดนิรภัยในรถยนต์

Risk Assessment of Destructive Process of Airbag and Seat Belt in Automobiles

สิทธา ธงไชย[1] และ ดวงฤดี ฉายสุวรรณ[2*]

Sitta Thongchai[1] and Duangrudee Chaysuwan[2*]

บทคัดย่อ

การประเมินความเสี่ยงที่เกิดจากกระบวนการทำลายอุปกรณ์ของถุงลมและเข็มขัดนิรภัยในรถยนต์ที่มีความบกพร่องจากอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อะไหล่และส่วนประกอบรถยนต์มีความสำคัญพื้นฐานต่อเศรษฐกิจอุตสาหกรรม โดยในการประกอบกิจการเมื่อมีอุปกรณ์ที่ไม่ได้คุณภาพเกิดขึ้นต้องปฏิบัติตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 แต่ไม่สามารถหาผู้ที่รับกำจัดในประเทศไทยได้ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีส่วนผสมที่ก่อให้เกิดการระเบิดทำให้ต้องส่งไปกำจัดยังบริษัทแม่ที่สหรัฐอเมริกา อย่างไรก็ตามการขนส่งนั้นมีปัจจัยที่อาจก่อให้เกิดอันตราย เช่น ความร้อน แรงสั่นสะเทือน เป็นต้น อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงจึงจำเป็นต้องกำจัดด้วยตนเองภายในโรงงาน โดยโรงงานต้องดำเนินการตามรายงานการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากอันตรายที่อาจเกิดจากการประกอบกิจการโรงงานตามระเบียบกระทรวงอุตสาหกรรมว่าด้วยหลักเกณฑ์ชี้บ่งอันตราย บริหารจัดการความเสี่ยง พ.ศ. 2543 เพื่อกำหนดมาตรการความปลอดภัยและแนวทางการปฏิบัติงานที่เหมาะสมให้กับผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้กระบวนการทำลายได้มีโลหะเหลือทิ้งที่มีประโยชน์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วย

ABSTRACT

The risk assessment of automotive airbag and seat belt with defects from the manufacturing of spare parts and car components is basically important to the industrial economy. The destructive process requires to destroy defective products as the notification of the Ministry of Industry on the destructive process of wastes in 2005. In this case they could not find whom worked for the destructive process in Thailand because products used a mixture of explosion materials and it must be sent to the parent company in the United States. However, the transportation was likely to cause hazards, such as heat, vibration, etc. and the cost was quite high therefore, it was necessary to destroy by themselves in factory. The factory should operate in accordance with the Ministry of Industry guidelines on hazard identification as risk assessment and risk management in 2000 for appropriate safety measurement and practices to study the potential impacts and to prepare preventive procedures for workers. Moreover, some useful metal scraps as by-products from the destructive process have been obtained and used as recycled materials.

Key Words: destructive process, explosion, by-products, risk assessment, airbag and seat belt

*Corresponding author; e-mail address: Sitta1750@gmail.com, fengddc@ku.ac.th

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Safety Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

อุปกรณ์ของถุงลมนิรภัยและเข็มขัดนิรภัยในรถยนต์ที่มีความบกพร่องและไม่ได้คุณภาพ ได้แก่ อุปกรณ์จุดระเบิดก๊าซสำหรับถุงลมนิรภัย และอุปกรณ์กำเนิดก๊าซสำหรับเข็มขัดนิรภัย[1]จัดเป็นปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่ง ในกรณีที่จำเป็นจะต้องมีกระบวนการทำลายอุปกรณ์เหล่านี้ด้วยตนเองภายในบริเวณโรงงาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 [2] เนื่องจากตัวอุปกรณ์มีส่วนผสมของวัตถุดิบที่อาจก่อให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ และยังมีปัจจัยต่างๆ ที่เป็นความเสี่ยงอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและผู้ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง จึงทำให้กระบวนการทำลายอุปกรณ์ที่ไม่ได้คุณภาพจะต้องดำเนินการด้วยความไม่ประมาท ปฏิบัติตามกฎระเบียบอย่างเคร่งครัด เช่น การสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลให้ครบถ้วนทุกครั้ง นอกจากนี้ยังเกิดปัญหาและอุปสรรคในการปฏิบัติงาน เช่น เสียงดังรบกวน เขม่าควัน ฝุ่นละออง ความร้อน ประกายไฟ เป็นต้น ดังนั้นการจัดทำรายงานวิเคราะห์ความเสี่ยงจากอันตรายที่อาจเกิดขึ้น เป็นการบ่งชี้อันตรายและประเมินความเสี่ยงอันตรายจากกระบวนการทำลายอุปกรณ์ที่ไม่ได้คุณภาพ เพื่อกำหนดมาตรการความปลอดภัยและแนวทางการปฏิบัติงานที่เหมาะสมตามระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรม ว่าด้วยหลักเกณฑ์ชี้บ่งอันตราย การประเมินความเสี่ยงและการจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง พ.ศ. 2543 [3] อีกทั้งเป็นการศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น เพื่อเตรียมมาตรการป้องกันที่อาจจะเกิดกับผู้ปฏิบัติงานจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง วิธีการทำลายอุปกรณ์ที่ไม่ได้คุณภาพที่ใช้ในปัจจุบัน คือการให้ความร้อนจากแก๊สหุงต้ม เนื่องจากเห็นผลรวดเร็ว ประหยัดแรงงาน ประหยัดเวลา สะดวก มีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ นอกจากนี้ ในกระบวนการทำลายอุปกรณ์ก่อให้เกิดการได้เศษโลหะที่เป็นส่วนประกอบภายในอุปกรณ์จุดระเบิดก๊าซสำหรับถุงลมนิรภัย และอุปกรณ์กำเนิดก๊าซสำหรับเข็มขัดนิรภัย เศษโลหะดังกล่าว ได้แก่ Aluminium และ Stainless steel ทำให้สามารถนำเศษโลหะดังกล่าวกลับมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบทดแทนได้อีก

ถุงลมนิรภัยและเข็มขัดนิรภัยถือเป็นอุปกรณ์ที่มีสำคัญต่อความปลอดภัยของผู้ขับขี่รถยนต์เป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากในชีวิตประจำวันมีผู้ใช้รถใช้ถนนเป็นจำนวนมาก การที่มีอุปกรณ์ที่มีความบกพร่องมาเป็นส่วนประกอบในรถยนต์จึงเป็นอันตรายต่อชีวิตของผู้ขับขี่ โดยในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 [2] อุปกรณ์ของถุงลมนิรภัยและเข็มขัดนิรภัยถือเป็นชิ้นส่วนที่ระเบิดได้ (explosive components) จัดอยู่ในประเภทสารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances) ซึ่งเมื่อถูกทำให้ร้อนในที่จำกัดจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระเบิดรุนแรงได้และมีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย (Hazardous waste - Absolute entry, HA) เมื่อมีกระบวนการทำลายอุปกรณ์เหล่านี้ด้วยตนเองภายในบริเวณโรงงาน การวิเคราะห์ความเสี่ยงจากอันตรายที่อาจเกิดขึ้น การบ่งชี้อันตรายอีกทั้งประเมินความเสี่ยงอันตรายจากกระบวนการดังกล่าว ตามหลักเกณฑ์ชี้บ่งอันตราย การประเมินความเสี่ยงและการจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง พ.ศ. 2543 [3] จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดมาตรการความปลอดภัยและแนวทางการปฏิบัติงานที่มีความปลอดภัยเหมาะสม

วิธีการศึกษา

การประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment) เป็นการทำงานร่วมกับผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการทำลายอุปกรณ์ที่ไม่ได้คุณภาพ ได้แก่ หัวหน้าผู้ควบคุมงาน ผู้ปฏิบัติงาน และเจ้าหน้าที่ความปลอดภัย รายละเอียดของการทำงานประกอบด้วยการรวบรวมข้อมูลของอุปกรณ์ของถุงลมนิรภัยและเข็มขัดนิรภัยในรถยนต์ที่ไม่ได้คุณภาพ จากนั้นร่วมกันออกความเห็นในการจัดทำบัญชีของสิ่งที่เป็นความเสี่ยงและอันตราย ชี้บ่งอันตราย และประเมินความเสี่ยง โดยมีรายละเอียดตามหลักการของระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรมว่าด้วยหลักเกณฑ์การชี้บ่งอันตราย การประเมินความเสี่ยง และการจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง พ.ศ. 2543[3] ได้อธิบายวิธีการระบุลักษณะความเป็นอันตราย การประเมินความเสี่ยง และการจัดการความเสี่ยง (Hazard Identification, Risk Assessment and Risk Control: HIRCRC) ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน[4] ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จัดตั้งคณะทำงานที่ประกอบไปด้วยกลุ่มบุคคลที่มีความรู้เกี่ยวกับเครื่องมือในการชี้บ่งอันตรายและการประเมินความเสี่ยง บุคคลที่รู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิต เครื่องจักร และกิจกรรมที่จะประเมินความเสี่ยงด้วย รวมทั้งบุคคลที่มีความรู้เกี่ยวกับความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อมด้วยแล้วทำการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมเช่น ตำแหน่งที่ตั้ง อุปกรณ์ ขั้นตอนการผลิต จำนวนผู้ปฏิบัติงาน สถิติการเกิดอุบัติเหตุ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 จัดทำบัญชีรายการสิ่งที่เป็นความเสี่ยงและอันตราย โดยระดมความเห็นจากคณะทำงานที่จัดขึ้นโดยต้องพิจารณาความเสี่ยงหรืออันตรายรวมทั้งผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น บัญชีฯ ที่จัดทำต้องครอบคลุมทุกกิจกรรมทุกพื้นที่ ทุกคน และทุกกระบวนการ เพื่อให้การวิเคราะห์ความเสี่ยงจากอันตรายสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 3 ทำการชี้บ่งอันตรายที่มีหรือแอบแฝงในทุกขั้นตอนของแต่ละกิจกรรมที่เกี่ยวข้องโดยต้องชี้บ่งอันตรายทุกหัวข้อที่ปรากฏในบัญชีรายการสิ่งที่เป็นความเสี่ยงและอันตรายวิธีการชี้บ่งอันตรายที่นิยมใช้มีหลายวิธีสำหรับการศึกษานี้ได้เลือกใช้ 2 วิธี คือ What If Analysis[4] และ Checklist[5] วิธีแรกเป็นเทคนิคที่ระดมความเห็นในคณะทำงาน โดยการจัดกระบวนการอย่างง่ายและตั้งคำถามที่เกี่ยวข้องกับอันตรายที่เฉพาะเจาะจงโดยต้องถามลึกลงไปถึงพื้นที่หรือตำแหน่งที่สนใจศึกษา สามารถใช้ได้กับกิจกรรมทุกประเภทการดำเนินงานที่ไม่ซับซ้อน ผลที่ได้จากการทำ What If Analysis เรียกว่าทะเบียนความเสี่ยงซึ่งสามารถจัดทำข้อเสนอแนะที่ต้องการแก้ไขปัญหาต่อไป วิธีที่สองเป็นวิธีชี้บ่งอันตรายโดยการนำแบบตรวจไปใช้ในการตรวจสอบการดำเนินงานในโรงงานเพื่อค้นหาอันตรายประกอบด้วยหัวข้อคำถามที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานต่างๆ เพื่อตรวจสอบว่าได้ปฏิบัติตามมาตรฐานการออกแบบ การปฏิบัติงานหรือกฎหมายเพื่อนำผลจากการตรวจสอบมาทำการชี้บ่งอันตรายแล้วจึงประเมินความเสี่ยง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุของอันตรายที่มีโดยพิจารณาถึงโอกาสและความรุนแรงของอันตรายที่จะเกิดขึ้น[6]

ขั้นตอนที่ 4 การจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยงและสรุปผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากอันตรายเพื่อให้โรงงานนั้นได้เห็นความสำคัญและจัดทำสิ่งที่สามารถลดความเสี่ยงได้ ขั้นตอนสุดท้ายนี้ไม่ได้แสดงผลไว้ในบทความนี้ ในการศึกษานี้ได้พิจารณาถึงโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ว่ามีมากน้อยเพียงใดโดยระดับโอกาสเป็น 4 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

Table 1 Levels of opportunity in events[3]

Level	Details
1	Chance of a rare occurrence, such as never occurred in the period of 10 years or more.
2	Low probability of occurrence, such as frequency of occurrence 1 time in 5-10 years.
3	Moderate chance of occurrence, such as frequency of occurrence 1 time in 1-5 years.
4	High probability of occurrence, such as frequency of occurrence more than once in year.

พิจารณาถึงความรุนแรงของเหตุการณ์ต่างๆ ว่าจะก่อให้เกิดผลกระทบที่อาจเกิดต่อบุคคล หรือสิ่งแวดล้อมมากน้อยเพียงใด โดยจัดระดับความรุนแรงเป็น 4 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

Table 2 The severity of the events that affect to the person and environmental[3]

Level	Risk	Details (effects to person / effects to environmental)
1	Slight	There are minor injuries at the first aid level./ Can be controlled or action.
2	Moderate	There are injuries that require medical treatment./ Action in short time.
3	High	Have serious injuries or illness./ Need time to action.
4	Very high	Disability or death./ Need resources and so long time to action.

จัดระดับความเสี่ยง โดยพิจารณาถึงผลลัพธ์ของระดับโอกาสคูณกับระดับความรุนแรงที่มีผลกระทบต่อบุคคล หรือสิ่งแวดล้อม หากระดับความเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อบุคคล หรือสิ่งแวดล้อม มีค่าต่างกันให้เลือกระดับความเสี่ยงที่มีค่าสูงกว่าเป็นผลของการประเมินความเสี่ยงในเรื่องนั้นๆ เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นถ้าเหตุการณ์หนึ่งมีระดับโอกาสเป็น 3 (โอกาสเกิดขึ้นปานกลาง) และระดับความรุนแรงเป็น 4 (ความรุนแรงสูงมาก) ระดับความเสี่ยงจะเท่ากับ 3 x 4 = 12 แสดงว่าเหตุการณ์นี้มีระดับความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ ระดับความเสี่ยงจัดเป็น 4 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

Table 3 Hazard classification[3]

Risk Level	Result	Meaning
1	1-2	A little risk.
2	3-6	Acceptable risks control measures must be reviewed.
3	8-9	High risk operations need to be minimized.
4	12-16	The risk is unacceptable stopping and correcting to reduce risk immediately.

วิธีการทดสอบเพื่อประเมินความเสี่ยง

ศึกษาผลของการทำลายอุปกรณ์ของถุงลมและเข็มขัดนิรภัยที่ไม่ได้คุณภาพ โดยใช้ถังโลหะทรงกระบอกจำนวน 4 ถัง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร มีด้ามจับ 2 ข้าง พร้อม

ฝาปิดเส้นผ่านศูนย์กลาง 31 เซนติเมตร ถังโลหะต้องแข็งแรงทนต่อประกายไฟและความร้อนสูงได้เป็นเวลานาน จะต้องตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอถ้ามีความผิดปกติ เช่น มีรอยแตกร้าวต้องเปลี่ยนทันทีเพราะทำให้ความร้อนรั่วไหลออกมาจึงต้องเพิ่มอุณหภูมิในการเผาไหม้ขึ้นไปอีก ในขั้นตอนการทำลายอุปกรณ์ดังกล่าวนั้น ถ้าใส่อุปกรณ์ลงไปในถังมากเกินไปอาจทำให้ถังโลหะเกิดแตกและระเบิดได้ เนื่องจากตัวอุปกรณ์มีส่วนผสมของวัตถุดิบที่อาจก่อให้เกิดการระเบิด เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานอย่างมาก ประกอบกับวัตถุดิบที่อาจจะตกค้างในถังโลหะหรือตกหล่นในห้องทดสอบอาจทำให้เกิดอันตรายจากการระเบิดได้เช่นกัน ดังรูปที่ 1

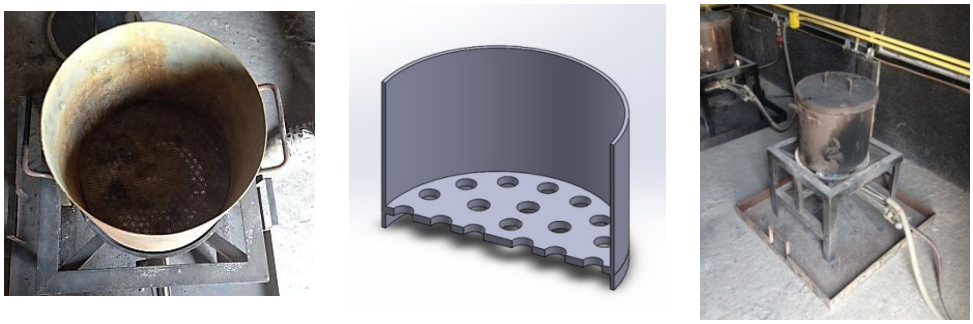


Figure 1 Metal tank

ถังโลหะทรงกระบอกติดตั้งอยู่ภายในห้องทดสอบที่มีความปลอดภัย หากภาชนะโลหะเกิดการระเบิด ห้องทดสอบที่ก่อสร้างด้วยอิฐทนไฟ (Fire resistant brick) มีความแข็งแรงทนทานสามารถทนต่อความร้อนสูงได้ ผนังรอบด้านติดตั้งวัสดุชนิดพิเศษสามารถยับยั้งการลุกลามของไฟ (Fire- retardant) และดูดซับเสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Soundproofing product) [7] ดังรูปที่ 2

Figure 2 Testing room with fire resistant brick and sound absorber (Ethylene Propylene Copolymer)

ก่อนเข้าห้องทดสอบผู้ปฏิบัติงานต้องสวมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลให้ครบถ้วนทุกครั้ง ดังรูปที่ 3

Figure 3 Personal Protective Equipment (PPE)

นำอุปกรณ์ของถุงลมนิรภัยและเข็มขัดนิรภัยในรถยนต์ที่มีความบกพร่องและไม่ได้คุณภาพ ใส่ถังโลหะประมาณ 10 - 15 ชิ้น ดังรูปที่ 4

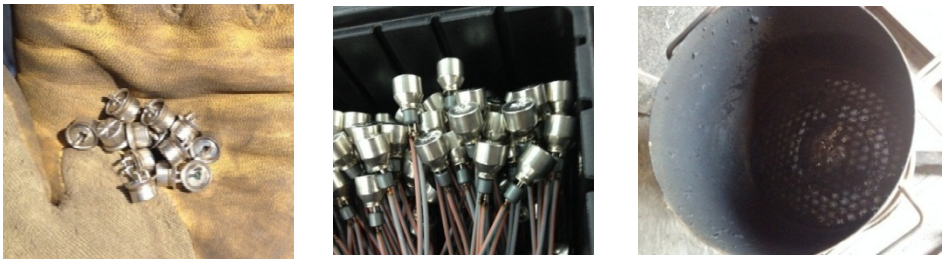


Figure 4 Defective products

ปิดประตูห้องทดสอบ และเปิดวาล์วแก๊สหุงต้ม (ขนาดความจุถังแก๊ส 15 – 45 กิโลกรัมต่อถัง) จากด้านนอก ใช้ความร้อนด้วยอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 5 – 10 นาที โดยมีหัวจ่ายแก๊ส (Burner) ทั้งหมด 4 ชุด พร้อมขาตั้ง (Stand) ที่มีขนาดกว้าง 0.3 เมตร ยาว 0.3 เมตร และสูง 0.4 เมตร ดังรูปที่ 5

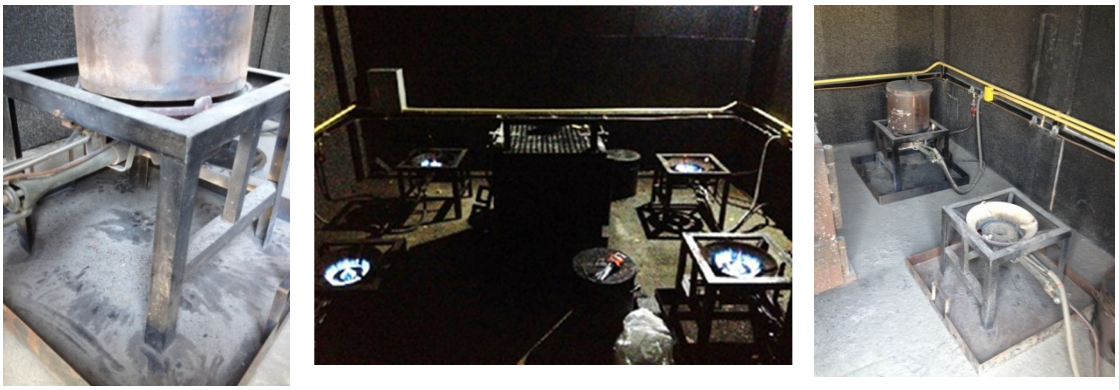


Figure 5 Heat operation equipment

ระหว่างนั้นจะได้ยินเสียงดังประทุภายในถังโลหะอย่างต่อเนื่อง เสียงประทุจะเงียบไปเมื่อทำลายวัตถุดิบในอุปกรณ์ที่ไม่ได้คุณภาพจนหมด จากนั้นรอเวลาประมาณ 5 - 7 นาที ให้อุณหภูมิภายในห้องทดสอบเย็นตัวลง ผู้ปฏิบัติงานจึงนำอุปกรณ์ที่ผ่านการเผาไหม้แล้วมาตรวจสอบ ถ้ามีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะได้เศษโลหะ ได้แก่ Aluminium และ Stainless steel สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบทดแทนได้อีก ดังรูปที่ 6

Figure 6 Useful metal scrap from destructive process

ระบบระบายอากาศที่ติดตั้งบริเวณด้านหลังห้องทดสอบ มีการใช้น้ำเพื่อดักจับฝุ่น เขม่าควันและระบายความร้อน มอเตอร์ดูดฝุ่นและเขม่าควันต้องทำงานได้ตลอดเวลาทำงาน และใช้แผ่นกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพในการกรองสูง ทำให้ไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและผู้ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงห้องทดสอบ ดังรูปที่ 7

Motor blower Motor water pump Carbon filter

Figure 7 Ventilation systems

ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

ผู้ปฏิบัติงานตรวจวัดค่าระดับเสียงที่เกิดจากการระเบิด โดยใช้เครื่องมือตรวจวัดปริมาณเสียง (Sound level meter) จากห้องทดสอบที่ระยะ 5 – 25 เมตร โดยเพิ่มระยะทางครั้งละ 5 เมตร[8] 2 ช่วงเวลาได้แก่ 10.00น. และ 14.00น.ดังแสดงในตารางที่ 4

Table 4 Sound measurement results

Time	5 Meters (dBA)	10 Meters (dBA)	15 Meters (dBA)	20 Meters (dBA)	25 Meters (dBA)
10.00	65.0	58.2	57.0	56.5	57.2
14.00	63.5	60.5	57.6	57.5	59.5
Sound level average	64.3	59.4	57.3	57.0	58.4

ผลการวัดปรากฏว่าระดับเสียงไม่เกินค่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนด (เวลาการทำงานที่ได้รับเสียงใน 1 ชั่วโมง ระดับเสียงเฉลี่ยตลอดเวลาการทำงานต้องไม่เกิน 105 dBA[9] ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อหูและส่งผลกระทบต่อการได้ยินของผู้ปฏิบัติงาน ทั้งนี้ผู้ปฏิบัติงานจะต้องสวมอุปกรณ์ลดเสียงเพื่อป้องกันอันตรายด้วย และผู้ศึกษาพบว่าเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้อุปกรณ์ในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน คือตั้งแต่ 5 นาทีจนถึง 10 นาที โดยประมาณจึงได้บันทึกเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้จำนวนทั้งหมด 60 รอบ ดังแสดงในตารางที่ 5

Table 5 Destructive time

Destructive time	5.05 min	5.55 min	6.30 min	7.27 min	9.20 min	9.45 min
Frequency	15 batch	9 batch	13 batch	12 batch	6 batch	5 batch

จากสถิติดังกล่าว เวลาที่แตกต่างกันเกิดจากการที่ไม่ได้แยกชนิดของอุปกรณ์ที่ไม่ได้คุณภาพ ซึ่งอุปกรณ์จุดระเบิดก๊าซสำหรับถุงลมนิรภัยมีปริมาณที่มากกว่าและมีส่วนผสมวัตถุดิบที่อาจก่อให้เกิดการระเบิดน้อยกว่าอุปกรณ์กำเนิดก๊าซสำหรับเข็มขัดนิรภัย จึงทำให้ใช้เวลาในการเผาไหม้ค่อนข้างเร็ว อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้พบว่าถ้าให้ความร้อนเป็นเวลาอย่างน้อย 10 นาที กระบวนการทำลายอุปกรณ์จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์และยังได้เศษแร่โลหะ เช่น Aluminium และ Stainless steel ที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก

สรุป

กระบวนการทำลายอุปกรณ์ของถุงลมและเข็มขัดนิรภัยในรถยนต์ที่มีความบกพร่องและไม่ได้คุณภาพเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย ไม่เกิดความเสี่ยงภัยในด้านสุขภาพต่อผู้ปฏิบัติงานและผู้ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่โครงการ และเพื่อนนิสิตสาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ช่วยบูรณาการความรู้และประสบการณ์ด้านวิศวกรรมความปลอดภัยตลอดช่วงระยะเวลาการศึกษาปริญญาโท โดยเฉพาะอย่างยิ่งรองศาสตราจารย์เลิศชัย ระตะนะอาพร

ขอขอบคุณโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนพิเศษเพื่อความปลอดภัยในรถยนต์แห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

Automotive Products List Pricing.2017 **Automotive Airbag Initiators and Micro Gas Generators** http://www.specialdevices.com/docs/AUTOPriceList2017.pdf,_November 3,_2017.

กระทรวงอุตสาหกรรม.2548. **ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว** .ประกาศในราชกิจจานุเบกษา 25 มกราคม 2548. เล่ม123 ตอนพิเศษ 11ง. 14-19.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม.2543. **ระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรม ว่าด้วยหลักเกณฑ์ชี้บ่งอันตราย การประเมินความเสี่ยง และการจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง**.

อนิกูล สวนดอกไม้. 2553. **การประเมินความเสี่ยงและศึกษาความรุนแรงของการระเบิดจากการเชื่อมโดยใช้แก๊ส**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุเนตร มูลทา.2559. **ตำราประกอบการเรียน วิชา วิศวกรรมความปลอดภัย**.แหล่งที่มา http://ie.pit.ac.th/sunetr/images/data/safety_engineering/chapter6_risk.pdf,_November 3,_2017.

เศรษฐสิริ ธรรมกวินวงศ์. 2560. **การประเมินความเสี่ยงของการระเบิดเตาเผาโดยวิธี HAZOP ในระบบการผลิตชิ้นงานอลูมิเนียม**.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Acoustical Surfaces,Inc.2004.**Material Safety Data Sheet "ARPRO™FIRE RETARDANT POROUS EXPANDED POLYPROPYLENE BEAD PLANK (PEPP)**.ver.no.2 Available Source https://www.acousticalsurfaces.com Soundproofing/Acoustics/Noise & Vibration Control Specialists,_November 3,_2017.

Robert M. Gagnon. 1998. **Design of Special Hazard and Fire Alarm Systems**.Chapter 12 Fire Alarm Notification Applinces and Control Panels Delmar Pulishers. USA: 226-232.

กฎกระทรวงแรงงาน. 2549. **กำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง** ประกาศในราชกิจจานุเบกษา 6 มีนาคม 2549. เล่ม123 ตอนที่ 23 ก. 13-20.

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลสัตว์

Study of Biogas Production from Napier Grass Juice with Animal Waste

สิริญญา เพียรวิริยพงษ์[1*] พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ[1] และ สุชาติ เหลืองประเสริฐ[1]

Sirinya Phianwiriyaphong[1*], Peerakarn Banjerdkij[1] and Suchat Leungprasert[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์หมักร่วมกับมูลสัตว์ โดยใช้สารตั้งต้นจากน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์ และหัวเชื้อจุลินทรีย์จากมูลสัตว์(สุกร,โคและไก่จากระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน) เดินระบบการหมักขั้นตอนเดียวแบบกึ่งต่อเนื่องในถังหมักขนาดการใช้งาน 5 ลิตร โดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากมูลสัตว์เป็นสารตั้งต้นร่วม 10 เปอร์เซ็นต์ของระบบ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมีค่า 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีระยะเวลากักเก็บ 23 วัน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30±2 องศาเซลเซียส ควบคุมการกวนที่ 60 รอบต่อนาที พบว่าระบบให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดจากการหมักร่วมของน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์กับเชื้อจุลินทรีย์จากมูลโคโดยให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 76.82 ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัดและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีเท่ากับ 61.19 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

This research aimed to study biogas production from co-digestion between napier grass extract with animal waste. Used substrate from napier grass extract. Microorganisms are used from three types of animal waste (pig, cow and chickens from anaerobic process). The 5 liter bioreactor operated at an organic loading rate of 1.6 kg COD/m^3.day in a semi-continuous single-stage process. The reactors were operated under anaerobic conditions at a temperature of 30±2 °C, stirred 60 rpm.. Used microorganisms derived from animal manure 10% that from anaerobic process. The hydraulic retention time was 23 days. The maximum methane yield was 76.82 L at STP/kg of COD degraded from napier grass juice with cow waste. At this co-digestion the efficiency of removal COD was 61.19 %.

Key words: Biogas, Anaerobic digestion, Napier, Napier grass juice, Methane gas production potential

*Corresponding author; e-mail address: naykung_nay@hotmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของประชากร การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พลังงานมีจำกัดและขาดแคลน รวมถึงสถานการณ์ความต้องการด้านพลังงานของประเทศไทยและทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปีเนื่องจากพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อต้นทุนของประเทศในทุกด้านจากปัญหาสถานการณ์ด้านพลังงานที่เกิดขึ้น ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาของประเทศไทย การผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในประเทศไทยร้อยละ 70 มาจากก๊าซธรรมชาติและต้องนำเข้าจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ(กพช.) และกระทรวงพลังงานได้กำหนดแผนงานให้มีเป้าหมายในการใช้พลังงานทางเลือกแทนพลังงานฟอสซิลให้ได้ร้อยละ 25 ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2555 – 2564) (กระทรวงพลังงาน,2558)ดังนั้นการสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากที่ควรให้ความสำคัญ จึงทำให้มีการคิดต้นและนำพลังงานจากแหล่งอื่นมาใช้ทดแทน ซึ่งแหล่งพลังงานทดแทนใหม่นั้นจะต้องเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แหล่งพลังงานทดแทนในที่นี้คือ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากก๊าซชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งพลังงานจากก๊าซชีวภาพก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนซึ่งต่อมาได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้นอกจากได้พลังงานจากก๊าซชีวภาพแล้วในกระบวนการหมักย่อยจะยังสามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำและยังช่วยลดภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย(ก๊าซชีวภาพและการนำไปใช้ประโยชน์,2010)

หญ้าเนเปียร์ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Pennisetum purpureum* เป็นพืชนำเข้าจากประเทศไต้หวันมีลักษณะคล้ายต้นอ้อยมีใบหนาและกว้าง (ข้อมูลการปลูกหญ้า, 2558) จากการศึกษาพบว่าหญ้าเนเปียร์หรือหญ้าเลี้ยงช้างมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีโปรตีน 13 - 17% และคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ (Water Soluble Carbohydrate,WSC) 11-12% ให้ผลผลิต น้ำหนักสด 12-15ตันไร่ต่อรอบการตัดทุก 60 วัน (ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา, 2552) หญ้าเนเปียร์เป็นพืชที่ปลูกง่ายและโตไวจึงนิยมปลูกกันอย่างแพร่หลาย โดยแต่เดิมปลูกในครัวเรือนและชุมชน เพื่อใช้เป็นพืชอาหารสัตว์เนื่องจากหญ้าเนเปียร์มีสารอาหารค่อนข้างสูง เมื่อเหลือจากการเลี้ยงสัตว์แล้ว จะมีการนำหญ้ามาลดความชื้นด้วยการรีดน้ำออก เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการผลิตชีวมวลต่อไป ทั้งนี้น้ำที่รีดหรือคั้นออกจากหญ้าเนเปียร์มีปริมาณค่าสารอินทรีย์ที่สูง เมื่อปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะส่งผลให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการนำน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์ส่วนที่เหลือทิ้งที่อาจเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมนำมาประยุกต์ใช้ในการหมักร่วมกับมูลสัตว์ในสภาวะไร้ออกซิเจนในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการริเริ่มหาวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกในอนาคต และศึกษาถึงประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์ส่วนที่เหลือทิ้งที่ต้องปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

สร้างถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic reactor) ด้วยถังพลาสติกจำนวน 3 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยถังติดตั้งชุดใบกวน มีขนาดการใช้งาน 5 ลิตร เก็บก๊าซโดยการแทนที่น้ำ (Water displacement) ซึ่งใช้สารละลายซัลฟูริก (Sulfuric) เข้มข้น 0.05 โมลาร์ บรรจุแทนน้ำในถังเก็บก๊าซ และมีจุดสำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซ (Gas sampling point) เพื่อเก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซและปริมาณก๊าซมีเทน (CH_4) (Figure 1, Table 1)

การเตรียมคั้นจากหญ้าเนเปียร์สำหรับใช้เป็นสารตั้งต้น การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างหญ้าเนเปียร์จากแปลงปลูกพืชไร่ ของภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน โดยนำหญ้าเนเปียร์อายุประมาณ 60 วัน นำมาบดย่อยลดขนาด จากนั้นคั้นแยกกากและน้ำหญ้าโดยใช้เครื่องบีบแยกน้ำระบบไฮโดรลิค ซึ่งกระบวนการนี้จำเป็นต้องเก็บรักษาสภาพน้ำหญ้าไว้ที่ตู้แช่เย็นอุณหภูมิ 4 องศา จากนั้นทำการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์เพื่อคำนวณการเดินระบบดังนี้ ค่าเริ่มต้นของซีโอดี (Chemical oxygen demand: COD) ของแข็งทั้งหมด (Total solids) ของแข็งระเหยทั้งหมด (Total volatile solid) ไนโตรเจน (TKN) ความเป็นกรดด่าง (pH) และความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (Oxidation Reduction Potential)

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นร่วมในการทดลอง คือ เชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นหัวเชื้อหัวตั้งต้น(seeding)จากการหมักร่วมของน้ำหญ้าเนเปียร์กับมูลสัตว์จนเกิดเป็นเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ โดยเริ่มเลี้ยงเชื้อจากการนำมูลสัตว์ 3 ชนิด(สุกร,โคและไก่)ผสมกับน้ำและน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:1:1 ในถังหมักขนาดการใช้งาน 5 ลิตร จากนั้นทำการเลี้ยงเชื้อโดยการเติมสารตั้งต้น (น้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์) ตามค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ได้คำนวณไว้จนกระทั่งในระบบเกิดก๊าซชีวภาพขึ้น (ตรวจสอบจากการเก็บก๊าซแล้วนำไปวิเคราะห์แยกองค์ประกอบก๊าซโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ Gas chromatograph) เมื่อระบบเริ่มมีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้นจึงนำน้ำออกจากระบบ แยกส่วนที่ใสออกมาทำเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น(seeding) จากนั้นจึงนำมาเติมเข้าระบบในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ของระบบลงในแต่ละถังและวิเคราะห์มวลจุลินทรีย์เริ่มต้นในระบบในรูปของ Mixed liquor suspended solids (MLSS)

ในการเดินระบบ (Start up) มีการควบคุมค่า pH ให้มีค่าประมาณ 7.5 ตลอดการเดินระบบ โดยทำการปรับค่าด้วยสารโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เมื่อ pH มีแนวโน้มต่ำลง และกวนผสมด้วยใบพัดในถังหมัก 60 รอบต่อนาที ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30±2 องศาเซลเซียส จดบันทึกข้อมูลและรายงานผลที่สภาวะคงที่ (Steady state) คือสภาวะของก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวันในระบบมีปริมาตรคงที่

การเดินระบบเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous operation) โดยการเติมเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นหัวเชื้อตั้งต้น(seeding)จากการหมักร่วมของน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์กับมูลสัตว์ 3 ชนิด ในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ของระบบและเติมน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์เข้าสู่ถังหมักขนาดการใช้งาน 5 ลิตรด้วยอัตรา230 มิลลิลิตรต่อวัน แต่ละถังมีระยะเวลากักเก็บในแต่ละถังเท่ากับ 23 วัน และค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เติมเข้าถังหมักแต่ละชุดมีค่าเท่ากับ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จากนั้นทำการบันทึกปริมาตรก๊าซ (Total gas) ที่เกิดขึ้นทุกวันโดยการวัดปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่และเก็บตัวอย่างก๊าซในระบบทุกๆ 3 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนด้วย Gas Chromatograph รายงานปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 0 °C ความดัน 1 บรรยากาศ) และเก็บสารละลายที่ออกจากระบบ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลือในรูปซีโอดี

ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย ไนโตรเจน สภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และวัดค่า pH หาประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (% COD degradation) คำนวณหาผลผลิตมีเทน (Methane yield) ในรูปของผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (L at STP/kg COD degradation)

ทำการบันทึกข้อมูลการเกิดก๊าซทุกวันจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) คือสภาวะของก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวันในระบบมีปริมาตรคงที่ ให้ทำการบันทึกต่อและตรวจเช็คค่าพารามิเตอร์ดังข้างต้นต่อไประยะหนึ่งจนพบว่าเมื่อทำการเดินระบบตามวิธีการข้างต้นต่อไปเรื่อยๆระบบจะผลิตก๊าซในปริมาตรคงที่เท่าเดิม

การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนใช้ Gas chromatograph รุ่น GC 6890 agilent technologies model: G 1530A ส่วนการวิเคราะห์ซีโอดีเป็นไปตามวิธี Standard Method (APHA&AWWA)

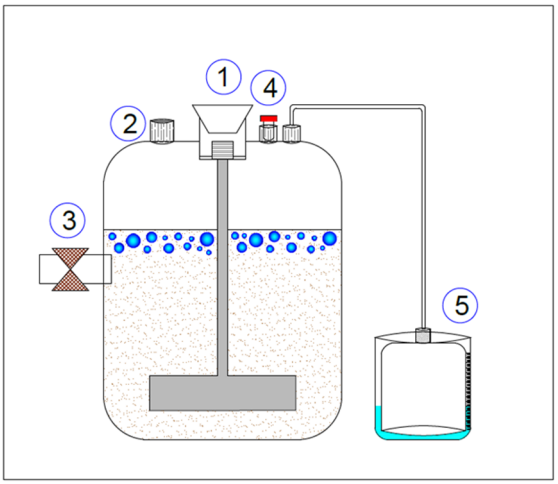


Figure 1 Anaerobic reactor and Gas collection system

number	Detail
1	Propeller motor
2	Influent
3	Effluent
4	Gas sampling point
5	Gas collector

Table 1 Description of Anaerobic reactor and Gas collection system in Figure1

ผลการทดลองและวิจารณ์

เมื่อเตรียมน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์ที่มีค่าซีโอดี 34,992 มิลลิกรัมต่อลิตร ผสมกับจุลินทรีย์หัวเชื้อตั้งต้น (seeding)แต่ละชนิด มีค่าเริ่มต้นของ pH ที่ปรับให้มีให้มีค่าประมาณ 7.5 คำนวณหาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จากสมการ (1)

$$\text{อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร)} = \frac{\text{อัตราการเติมสารตั้งต้นเข้าสู่ระบบต่อวัน x ซีโอดีเริ่มต้น}}{\text{ปริมาตรใช้งานของถังหมัก}} \quad (1)$$

จาก Figure 2 แสดงปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบจนถึงช่วงเข้าสู่สภาวะคงที่ของแต่ละหัวเชื้อ (สุกร,โคและไก่) โดยพบว่าช่วงแรกของการหมักร่วม ระบบจะสร้างก๊าซในปริมาณมากแต่มีค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนปริมาณต่ำเนื่องจากเป็นการทำงานของจุลินทรีย์ของระบบในช่วงแรก(จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์และ

จุลินทรีย์หมักกรด)จากนั้นปริมาตรก๊าซจะลดลงแล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงช่วงที่เข้าสู่สภาวะคงที่โดยในช่วงนี้จะมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่สูงขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงค่าใน Figure 3

Figure 3 เป็นการแสดงเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ตลอดระยะเวลาการดำเนินระบบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (มูลสุกร,มูลโค และมูลไก่เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 51 ,47 และ 51 ตามลำดับ)

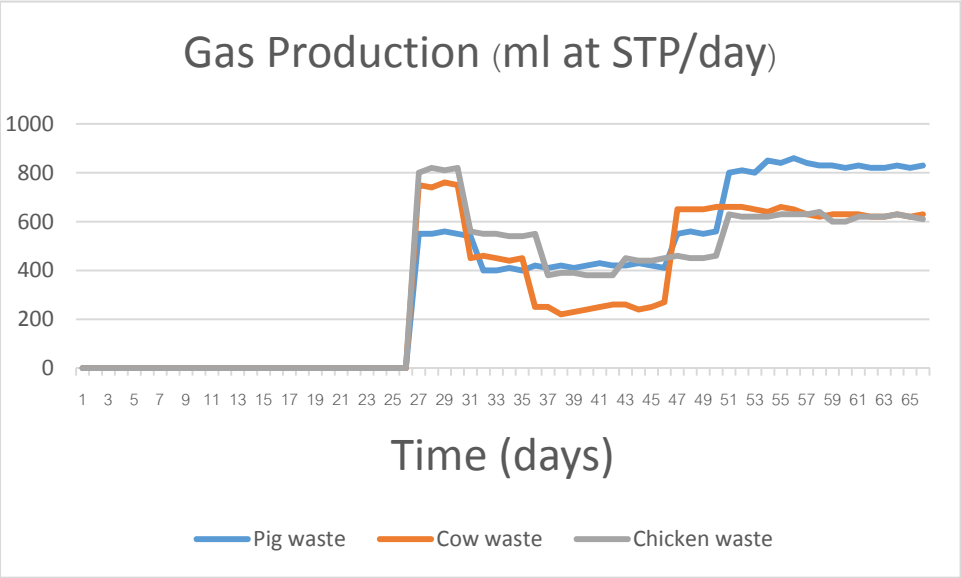


Figure 2 Volume of total gas production (ml at STP/day) from co-digestion between napier grass juice with three animal waste on anaerobic processes

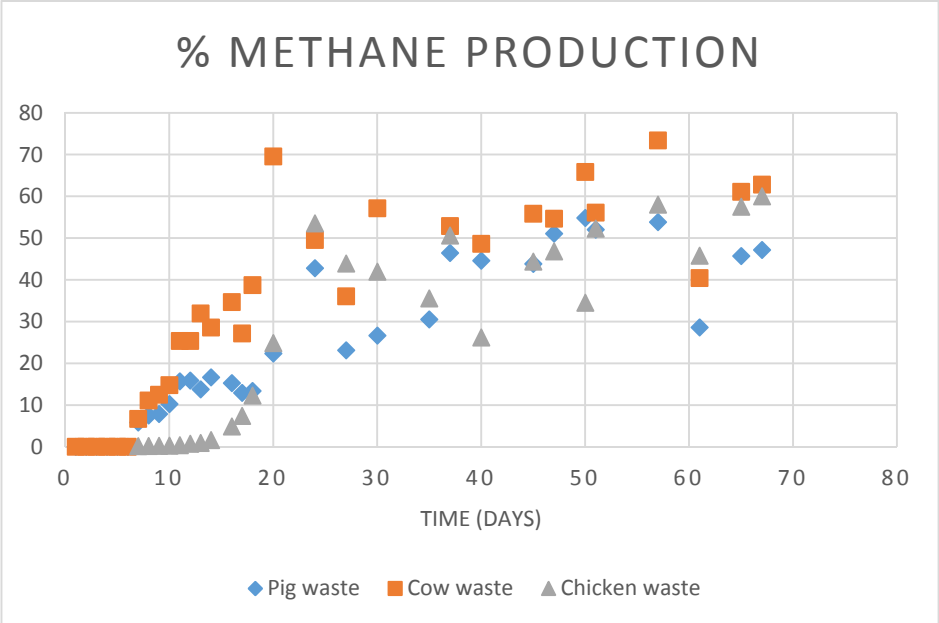


Figure 3 Percent of methane production

ผลการทดลองในที่แสดงพารามิเตอร์ต่างๆในการเดินระบบ ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และผลผลิตก๊าซมีเทน แสดงดัง Table 2

Table 2 Comparative study of co-digestion between napier grass juice with three animal waste. (pig, cow and chicken)

Parameter	Organic loading rate of 1.6 kg COD/m^3.day		
	Pig waste	Cow waste	Chicken waste
Volume of reactor (L)	5	5	5
Influent rate (ml/day)	230	230	230
Hydraulic retention time (day)	23	23	23
Initial pH	7.50	7.50	7.50
Average of temperature (^{o}C)	30.2	30.3	30.2
Average COD added (mg COD/L) (Influent)	34,992	34,992	34,992
Average COD out of the system (mg COD/L) (Effluent)	13,100	13,579	14,162
COD removal efficiency (%)	62.56	61.19	59.53
Volume of total gas produced (ml at STP/day)	826	640	621
Average of percent of methane production (%)	45.46	59.16	57.70
Methane yield (L at STP/kg COD degraded)	74.66	76.82	70.93
Average of pH in system	7.47	7.58	7.49

จากการหมักร่วมของน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์กับหัวเชื้อจุลินทรีย์จากมูลสุกร, มูลโค และมูลไก่ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าค่าซีโอดีเฉลี่ยที่ออกจากระบบมีค่าเท่ากับ13,100, 13,579 และ 14,162 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 62.56, 61.19 และ 59.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับดังแสดงใน Table 2 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพตามค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากทั้งสามระบบ(มูลสุกร, มูลโค และมูลไก่) โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 4.30, 2.89 และ 3.36 ตามลำดับ

ผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) คือปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด คำนวณได้ดังสมการ (2)

$$\text{ผลผลิตก๊าซมีเทน (ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด)} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน}}{\text{อัตราการเติมสารตั้งต้นเข้าระบบต่อวัน x (ซีโอดีเข้าระบบ-ซีโอดีออกจากระบบ)}} \quad (2)$$

จาก Table2 จากการทดลองพบว่าจากการหมักร่วมของน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์กับเชื้อจุลินทรีย์ทั้งสามระบบ(มูลสุกร, มูลโค และมูลไก่) ให้ค่าผลผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 74.66, 76.82 และ 70.93 ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด โดยการหมักร่วมจากระบบที่ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากจากมูลโคให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดมีค่าเฉลี่ยที่ 76.82 ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพตามค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากทั้งสามระบบ(มูลสุกร, มูลโค และมูลไก่) โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 1.46, 1.81 และ 1.24 ตามลำดับ

ในทดลองพบว่าค่า pH เริ่มต้นในระบบจะมีค่าลดลงอย่างมากในช่วงแรกที่มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ จึงมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เพื่อรักษาค่า pH ในระบบให้มีค่าประมาณ 7.5 และเมื่อทำการเดินระบบต่อไปพบว่าค่า pH จะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งส่งจะผลให้ปริมาณและเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนลดลงด้วย จึงต้องมีการควบคุมค่า pH โดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เพื่อปรับค่า pH ให้มีค่าประมาณ 7.5 ตลอดการทดลอง และจากผลตาม Table2 พบว่าเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าค่อนข้างต่ำ อาจเนื่องด้วยจากการการเติมเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นหัวเชื้อตั้งต้น(seeding)ในปริมาณเพียง 10เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้ทั้งสองค่าดังกล่าวมีค่าตามที่ปรากฏ ทั้งนี้ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นว่ามีความสัมพันธ์กับปริมาณการเกิดก๊าซ และ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากน้อยเพียงใด หรืออาจเป็นเพราะสารตั้งต้นมีค่าความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างสูง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าที่จำกัดต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ จึงควรมีการเจือจางสารตั้งต้นให้มีค่าปริมาณสารอินทรีย์ที่น้อยลง เพื่อให้มีความเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Xie, et al. (2011)จากการศึกษากระบวนการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและหญ้าเลี้ยงสัตว์โดยใช้อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรและหญ้าเลี้ยงสัตว์ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งพบว่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทนของอัตราส่วนระหว่างมูลสุกรและหญ้าเลี้ยงสัตว์ที่ 3:1 มีค่าการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดในขณะที่การทดลองเกิดการความล้มเหลวอัตราส่วนระหว่างมูลสุกรและหญ้าเลี้ยงสัตว์ที่ 0:1 ซึ่งพบว่าในการทดลองที่ใช้หญ้าหมักเพียงอย่างเดียวจะส่งผลให้ค่าพีเอชลดลงทันทีหลังจากเริ่มการทดลองจึงเป็นผลทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวในการผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหญ้าเนเปียร์หมักร่วมกับมูลสัตว์(หัวเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น)ในการทดลองนี้ พบว่าระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้จริง แต่ยังไม่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ เนื่องจากเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพร่วมกับผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) ยังมีค่าที่ต่ำกว่าที่ทฤษฎีในเรื่องของประสิทธิภาพในการการกำจัดของเสียในรูปCODและการเกิดก๊าซมีเทนที่ 350 Liters/kg COD degraded (กระทรวงพลังงาน,2553)อยู่มาก ซึ่งอาจเป็นเพราะมวลจุลินทรีย์ในการเริ่มต้นระบบมีน้อยเกินไป ทั้งนี้จึงควรทำการศึกษาเพิ่มในการหาปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นที่มีความเหมาะสมในการเดิน

ระบบเติมเพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์ต่อไป

สรุป

น้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพได้จากการหมักโดยระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียว ทำการเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยระบบให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดจากการหมักร่วมของน้ำคั้นจากหญ้าเนเปียร์กับเชื้อจุลินทรีย์จากมูลโคที่ 76.82 ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด มีโดยค่าเฉลี่ยค่าความเป็นกรด-ด่างในถังหมักเท่ากับ 7.58 ระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีได้ 61.19 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.**ข้อมูลการปลูกหญ้า**. (2558). สืบค้นเมื่อ 7 สิงหาคม 2559 แหล่งที่มา:.http://encrop.sut.ac.th/project/content

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.”**หญ้าเนเปียร์ พืชพลังงานสีเขียว**”.สืบค้นเมื่อ15 ธันวาคม 2559 แหล่งที่มา:. http://webkc.dede.go.th/testmax/node/152

ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชศรีมา. (2552). **หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1**. 2552. สืบค้นเมื่อ 27 ธันวาคม , 2559, แหล่งที่มา:.http://pakchang1.blogspot.com/2013/10/1-1-2.html?m=1

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2553). “**ก๊าซชีวภาพและการนำไปใช้ประโยชน์**”.สืบค้นเมื่อ 23 ธันวาคม, 2560, แหล่งที่มา:

APHA, AWWA, and WEF. 2005. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**, 20 th edition, Washington D.C.: American Public Health Association.

S. Xie, P.G. Lawlor, J.P. Frost, Z. Hu, X. Zhan. 2011. **Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of concentrated pig manure and grass silage**. Bioresource Technology 102 5728-5733.

พัฒนาการสัณฐานของปืนเล็กยาวจู่โจม

Physical Development of Assault Rifle

ชวาน พรรณดวงเนตร[1*]

Schwan Pundoangnetr[1*]

บทคัดย่อ

ปืนยาวเป็นประดิษฐกรรมที่เกิดขึ้นจากการค้นพบดินปืนในศตวรรษที่ 13 ส่งผลต่อสงครามและการเมือง ปืนเล็กยาวนั้นเป็นอาวุธประจำกายที่สำคัญของทหารราบ สรีระของมนุษย์จึงมีความสำคัญต่อการออกแบบสัณฐานปืน ด้วยวิทยาการและรูปแบบการรบที่เปลี่ยนไป ปืนเล็กยาวจู่โจมจึงมีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงมากว่า 70 ปี ทำให้สามารถศึกษาพัฒนาการทางสัณฐานของปืนเล็กยาวจู่โจมโดยสามารถจำแนกเป็น ด้ามจับ ศูนย์เล็ง พานท้าย และเส้นสายรูปทรง

ABSTRACT

Rifle is the invention derived from the discovery of gunpowder in the13th century, it affects war and politic. Rifle is also the most important personal weapon of infantry. The physical appearance of the rifle must follow human anatomy. As a result of the development of knowledge and military doctrine, the assault rifle has developed and changed over the 70 years period. The physical of the assault rifle, classified as hand grip, iron sight, stock and shape can be studied and analyzed and then presented in this paper.

Key Words : assault rifle

*Corresponding author; e-mail address: **schwan_p@rmutt.ac.th, schwan.p@gmail.com**

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

[1]Division of Architectural Technology Faculty of Architecture, Rajamangala University of Technology Thanyaburi Pathumthan

คำนำ

อาวุธคืออุปกรณ์ที่ใช้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความเสียหายต่อเป้าหมาย เช่น สิ่งมีชีวิต หรือสิ่งก่อสร้าง อาวุธเป็นสิ่งที่มนุษย์เริ่มประดิษฐ์และพัฒนามาอย่างยาวนาน โดยพัฒนาการของอาวุธบางประเภทนั้นจะขยายระยะทำการและเพิ่มความแม่นยำในการทำลายเป้าให้มากยิ่งขึ้น และเมื่อดินปืนหรือดินดำถูกค้นพบที่ประเทศจีน ได้ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานในการส่งอาวุธให้มีระยะทำการที่ไกลและรุนแรงมากขึ้น ดินปืนนั้น เป็นสารเคมีที่ไวไฟเมื่อติดไฟแล้วจะเกิดแก๊สที่ขยายตัวและมีพลังในการผลักดันกระสุนหรือส่งอาวุธออกไป ปืนใหญ่มือถือ (hand cannon) (McNab, 2014) เป็นปืนมีหลักการทำงานโดยการบรรจุดินปืนในท่อโลหะทรงกระบอกที่มีรูด้านข้างขนาดเล็กเพื่อนำลูกโลหะกลม เมื่อต้องการยิงจะใช้การจุดไฟที่รูด้านข้างทำให้ดินปืนลุกไหม้และเกิดแก๊สขับกระสุนปืนออกทางปากลำกล้อง ซึ่งพัฒนาต่อมาเป็นปืนไฟซึ่งใช้กลไกการจุดระเบิดด้วยสายเชือกติดไฟไว้กับก้านกระเดื่อง ต่อมาจึงใช้การจุดประกายไฟด้วยด้วยหิน (flint)ในปืนคาบศิลาและพัฒนาการมาใช้แก๊พ ซึ่งเป็นสารเคมีที่สามารถจุดระเบิดดินปืนได้โดยการกระทบมาใช้ในการจุดระเบิดดินปืน โดยวิธีการบรรจุกระสุนของปืนในยุคต้นนั้นจะบรรจุกระสุนทางปากกระบอกปืนซึ่งใช้เวลาในการบรรจุกระสุนแต่ละครั้งมากกว่า การพัฒนาวิธีบรรจุกระสุนทางรังเพลิงของปืน Dreyse needle ทำให้ทหารปรัสเซียสามารถบรรจุกระสุนได้ในท่านอนและมีความรวดเร็วในการบรรจุกระสุนเร็วกว่าทหารออสเตรีย ทำให้ฝ่ายปรัสเซียมีความได้เปรียบในสงคราม ออสโตร-ปรัสเซียน

พัฒนาการของปืนเล็กยาวจู่โจม

ยุคหลังสงครามโลกครั้งที่ 2

ปืนเล็กยาว (rifle) คือปืนขนาดเล็ก ลำกล้องยาวที่มีเกลียวในลำกล้อง(rifling)เพื่อช่วยให้กระสุนหมุนทำให้เกิดเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ของกระสุน (Candrsenal, 2017) ปืนกลไกแบบลูกเลื่อน (bolt-action) ถูกใช้เป็นอาวุธประจำกายของทหารราบในหลายประเทศ เช่น คาร์98เมาเซอร์ (Kar 98 Mauser) ประเทศเยอรมนี ที่สามารถติดอุปกรณ์ให้ยิงลูกระเบิดได้ โมซินนากังค์ (Mosin-Nagant) สหภาพโซเวียต ปืนลีเอนฟิลด์ (Lee–Enfield) ของสหราชอาณาจักรปืนอะริซากะ (Arisaka) ของจักรวรรดิญี่ปุ่น ประเทศไทยหรือสยามเคยใช้ปืนเล็กยาว ร121 .ศ. หรือ ปลย. 45 ผลิตจากประเทศญี่ปุ่นโดยใช้รูปแบบปืน Mauser M 1894 ซึ่งเรียกปืนชนิดนี้ว่า "สยามเมาเซอร์" ปืนลูกเลื่อนในยุคนี้มีระยะยิงหวังผลประมาณ 700-800 ม. ซึ่งเหมาะสมกับการรับแบบสนามเพลาะในสงครามโลกครั้งที่ 1

Figure 1 Kar 98 Mauser Bolt-action rifle

ต่อมาในสงครามโลกครั้งที่ 2 วิธีการรบที่เปลี่ยนไปเป็นการรบที่ต้องการความคล่องตัวในการเคลื่อนที่และอำนาจการยิงที่สูงขึ้น จึงมีการพัฒนาปืนเล็กยาวจู่โจม (assault rifle) ซึ่งเป็นปืนยาวที่ทำการยิงกึ่งอัตโนมัติหรืออัตโนมัติได้ ใช้งานได้คล่องตัวน้ำหนักเบามีระยะหวังผลและอำนาจการหยุดยั้งที่เหมาะสมในการต่อสู้ (โมเดิร์นไฟร์อาร์มส์, 2560) โดยปืนรุ่น Stg44 (Sturmgewehr 44) ถือเป็นปืนเล็กยาวจู่โจมแบบแรก โดยคำว่า

“ชตุมแกแวร์” ในภาษาเยอรมนีหมายถึง ปืนยาวพายุ ซึ่งลักษณะของStg44 นั้นมีโครงสร้างโดยรวมเป็นเหล็กโดยมีส่วนของพานท้ายและด้ามจับที่ทำจากไม้ ด้ามจับนั้นเปลี่ยนจากคอปืนของปืนลูกเลื่อนมาเป็นด้ามจับแบบปืนพก บรรจุกระสุนด้วยซองกระสุน (magazine) 30 นัด ขนาด 7.92 x 33 มม. Kurz ที่มีขนาดเล็กลง ปืนที่สามารถปรับการยิงแบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติได้ ปืนยาวแบบบรรจุเองนั้นได้ถูกนำมาใช้ตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่ 1 แล้ว เช่น ปืน Chauchat แต่ปืนเป็นดังกล่าวก็มีน้ำหนักมาก มีแรงสะท้อนกลับ (recoil) สูงจึงไม่จัดอยู่ในกลุ่มปืนเล็กยาวจู่โจม (Sommerville, 2011) ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 นั้นสหรัฐอเมริกาใช้ M1 Garand เป็นอาวุธประจำกายสามารถยิงแบบกึ่งอัตโนมัติได้ บรรจุกระสุน8นัดจึงมีอัตราการยิงที่เหนือกว่าปืนแบบลูกเลื่อน และถูกพัฒนาทดลองหลากหลายรูปแบบภายหลังสิ้นสุดสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้พัฒนามาเป็นปืน m14 ตัวปืนทำจากไม้มีด้ามจับแบบคอปืน มีซองกระสุน คันรั้งอยู่ด้านข้างทางขวาของปืนและสามารถปรับการยิงได้ทั้งแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ แต่เนื่องจากมีน้ำหนักของตัวปืนและแรงสะท้อนกลับสูง ปืน M14 จึงจัดอยู่ในกลุ่มปืนประจัญบานทำให้มีช่วงเวลาประจำการเพียง 5 ปี สหรัฐอเมริกาจึงออกแบบ ปืน M16 มาทดแทนโดยเป็นปืนที่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปทรงและวัสดุ โดยโครงปืนนั้นทำจากอะลูมิเนียม กระโจมมือและพานท้ายเป็นพลาสติกคอมโพสิตสีดำใช้กระสุนขนาดเล็กลง ด้ามจับเป็นแบบปืนพก แนวพานท้ายซึ่งเป็นจุดหมุนเมื่อเกิดแรงสะท้อนเป็นแนวตรงกับลำกล้องทำให้ไม่เกิดโมเมนต์จากแรงสะท้อนของปืนโดยแก้ไขปัญหาในการประทับเล็งจากรูปแบบพานท้ายด้วยการปรับแนวศูนย์เล็งให้ยกสูงขึ้น คล้าย FG42 ศูนย์หลังออกแบบให้ใช้เป็นหูหิ้วปืนไปในตัว คั้นรั้งอยู่ท้ายโครงปืนทำให้ง่ายต่อการดึงคันรั้งได้ทั้งมือซ้ายและขวา ด้วยตัวปืนที่มีขนาดและน้ำหนักลดลง ถูกใช้ครั้งแรกในสงครามเวียดนามและถูกปรับปรุงจนใช้งานได้เป็นอย่างดี และโครงสร้างพื้นฐานของ M16 ได้ถูกพัฒนาเป็นรุ่นย่อยใช้ในงานต่าง ๆ เช่นกลุ่ม M4 ที่มีขนาดสั้นลง มีพานท้ายที่สามารถยืดหดปรับระยะได้ตามความยาวแขนของผู้ใช้งาน มีรางติดอุปกรณ์เอนกประสงค์โดยในรุ่น M16A4 สามารถถอดหูหิ้วเพื่อติดอุปกรณ์ช่วงเล็งอื่น ๆ ทดแทนได้ กระโจมมือมีรางติดอุปกรณ์ เช่นไฟฉาย ขาทราย เครื่องยิงลูกระเบิด

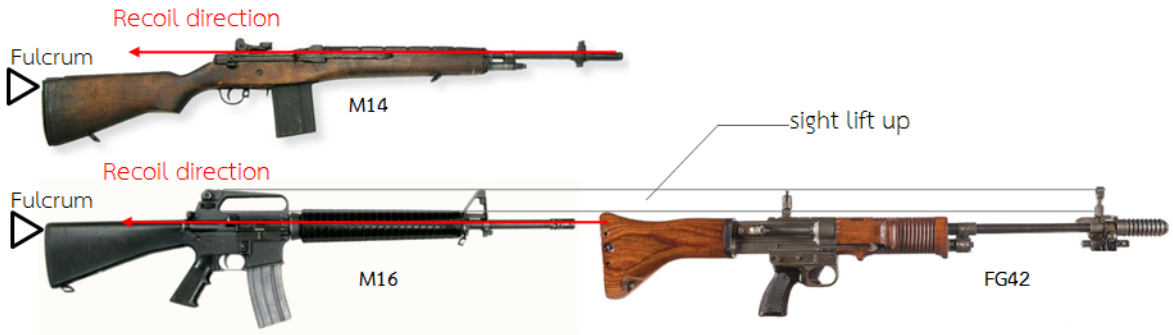


Figure 2 Moment reduction design in M16

สหภาพโซเวียตได้เริ่มพัฒนาปืนเล็กยาวจู่โจมมาตั้งแต่ช่วงปลายสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยเริ่มลดขนาดกระสุนปืนจากกระสุน 7.62×54 มม. ของปืนลูกเลื่อน โมซินนากังค์ (Mosin-Nagant) และ ปืนยาวบรรจุเอง SVT-40 มาใช้กระสุนขนาด 7.62×39 มม. ซึ่งมีแนวคิดในการลดขนาดกระสุนจาก Stg 44 โดยเริ่มใช้กับปืนยาวบรรจุเองแบบเซกาเซ่ (SKS) ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็นไม้และเหล็กมีด้ามจับแบบคอปืน ภายหลังสงครามได้พัฒนาต่อมาเป็นปืน AK46 ที่ได้รับอิทธิพลมาจาก STG44 และปรับปรุงมาเป็น AK47 มีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไป คือมี

ด้ามจับแบบปืนพกทำด้วยไม้เช่นเดียวกับพานท้ายและกระโจมมือ ศูนย์หลังอยู่หลังกระโจมมือ ศูนย์หน้ายกสูงกว่าแนวลำกล้องขึ้นมาอยู่ในระดับเดียวกับศูนย์หลัง คันรั้งยังอยู่ในตำแหน่งข้างขวาบริเวณช่องคัดปลอกกระสุน ก้านปรับการยิงได้จะเรียงจากแบบห้ามยิงไปยังแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติซึ่งแตกต่างจากปุ่มปรับการยิงในปืนรุ่นอื่นที่ปรับจากแบบห้ามยิงไปยังแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ มีรุ่นย่อย AKS พานท้ายพับเพื่อความคล่องตัว คล้ายกับพานท้ายของปืนกลมือ MP40 ต่อมาในช่วงทศวรรษที่1950 ปืน AKM ถูกพัฒนาขึ้นซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเพียงเล็กน้อยบริเวณปากลำกล้องมีลักษณะปาดเฉียงเพื่อชดเชยการสะท้อนของปืน รูปแบบการผลิตเปลี่ยนจากการกลึงมาใช้วิธีการปั๊มและพับแผ่นเล็ก ต่อมาในช่วงทศวรรษที่ 1970 ปืน AK74 ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นและใช้เป็นอาวุธประจำกายของสหภาพโซเวียตซึ่งมีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกับปืน AK47 ใช้กระสุนขนาด 45.5×39 มม. มีปลอกลดแสงเป็นทรงกระบอกมีช่องที่ปลายด้านข้างทั้งสองด้าน วัสดุเปลี่ยนจากการใช้ไม้จริงมาเป็นไม้ลามิเนตและพลาสติก พานท้ายในรุ่น AK74S เปลี่ยนมาใช้การพับด้านข้าง และถูกพัฒนามาเป็นปืน AK74U ที่มีน้ำหนักเบา และมีความยาวลดลง ภายหลังจากการล่มสลายของสหภาพโซเวียต ปืนเล็กยาวจู่โจมของรัสเซียก็ยังถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องในปี 2010 ปืนแบบ AK12 และ AK15 ถูกออกแบบขึ้นเป็นปืนที่ใช้กระสุนขนาด 45.5×39 และ 62.7×39 มม. ซึ่งมีลักษณะภายนอกนั้นรูปลักษณ์ของปืนที่ลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมาก พานท้ายปรับระยะและพับได้ ก้านปรับการยิงย้ายมาอยู่เหนือด้ามจับและมีขนาดเล็กลง ขึ้นศูนย์หลังถูกย้ายถอยไปอยู่ท้ายตัวปืนและมีรางติดอุปกรณ์ตลอดด้านบนตัวปืนไปถึงกระโจมมือและด้านล่างของกระโจมมือ

Figure 3 AKM and AKMS folding stock

การออกแบบปืนเล็กยาวจู่โจมของชาติอื่น ๆ

นอกจากสหรัฐอเมริกาและสหภาพโซเวียตแล้ว เยอรมนีได้ออกแบบปืน H&K G3 ในช่วงทศวรรษที่ 1950 ร่วมกับสเปน โดยใช้กระสุนขนาดเดียวกับปืน M14 โครงปืนผลิตจากแผ่นโลหะปั๊มแล้วพับครึ่ง ด้ามจับ กระโจมมือและพานท้ายเป็นพลาสติก คันรั้งอยู่ด้านซ้ายบนตามแนวของกระโจมมือ มีพานท้ายแบบเต็ม และยึดหดด้วยการสไลด์ได้ ศูนย์เล็งเตี้ยแนวพานท้ายจึงถูกกดลงต่ำลง ต่อมาจึงมีการออกแบบให้ใช้กระสุน มาตรฐานอีกขนาดหนึ่งของนาโต้ คือขนาด 56.5×45 มม. ในรุ่น HK33 ซึ่งเป็นรุ่นที่กองทัพไทยนำมาเข้าผลิตใช้สำหรับเป็นอาวุธประจำกายใช้ชื่อว่า ปลย.11 และรูปทรงปืนนี้ยังถูกนำไปพัฒนาเป็นปืนกลมือรุ่น 4 MP5 ต่อมาในช่วงปลายทศวรรษที่ 1960 เยอรมนีได้พัฒนาปืน G11 มีรูปร่างเหลี่ยมตรง มีเพียงด้ามจับและโก่งไกที่ยื่นออกมาจากตัวปืน ใช้กระสุนแบบไร้ปลอกกระสุนซองกระสุนวางตามยาวด้านบนของตัวปืนกระสุนวางตั้งขวางกับแนวลำกล้องปืน แต่โครงการพัฒนาปืน G11ได้ถูกยกเลิกไปด้วยข้อจำกัดทางด้านงบประมาณและปัญหาของกระสุนแบบไร้ปลอก จึงกลับมาพัฒนาปืนที่ใช้กระสุน 56.5×45 มม.ในรุ่น G36 มีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไป โครงสร้างหลักของปืน

ผลิตจากพลาสติก สามารถถอดประกอบได้โดยหมุดเพียงสามชิ้น สามารถเปลี่ยนลำกล้องและกระโจมมือเพื่อให้เป็นปืนแบบสั้น ปืนกลเบาและปืนคอมแพคโดยใช้โครงปืนหลักร่วมกัน หูหิ้วด้านบนติดกล้องเล็งตายตัวไว้ที่ท้ายหูหิ้วซึ่งมีลักษณะแบนยาวจนถึงท้ายกระโจมมือซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นรางติดอุปกรณ์ช่วยเล็งอื่น ๆ ได้ คันรั้งอยู่ด้านบนตัวปืนใต้หูหิ้วโดยสามารถหักปลายได้ทั้งซ้ายขวาจึงบริหารกลไกได้ทั้งสองข้าง ซองกระสุนเป็นพลาสติกใสทำให้มองเห็นปริมาณกระสุนที่เหลืออยู่ได้ พานท้ายเป็นโครงโปร่งพับด้านข้างได้ (Gourley, 2547) นอกจากนี้เยอรมนีและสหรัฐอเมริกาได้ใช้โครงสร้างพื้นฐานของและการทำระบบลูกสูบจังหวะสั้นแบบ G36 ในการพัฒนาปืน XM8 ซึ่งรูปร่างโค้งมนใช้ซองกระสุนและตำแหน่งคันรั้งเหมือนกับ G36 แต่มีหูหิ้วที่โค้งมาบรรจบปลายกระโจมมือ พานท้ายไม่สามารถพับได้แต่สามารถปรับระยะยืดหดได้ ออกแบบให้ปรับเปลี่ยนเป็นแบบสั้นและคอมแพคได้ แต่ XM8 นั้นไม่ได้ถูกนำไปใช้จริง หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาปืนจากระบบการทำงานของG36 โดยยังคงใช้ระบบลูกสูบจังหวะสั้นในรุ่น HK416 ที่ถูกนำไปใช้ในหน่วยรบพิเศษของสหรัฐอเมริกา โดยทำการออกแบบให้มีรูปร่างภายนอกและวิธีการใช้งานคล้ายคลึงปืน M4 เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและฝึกฝนภายในกองทัพ นอกจากนี้ยังได้พัฒนา HK417 ที่ใช้กระสุนขนาด 7.62x51 มม. และ M27 ในการเป็นปืนกลเบาระดับหมู่ (วอร์ริเออร์หนุ่ม, 2559) รวมไปถึง SIG516 SIG716 ของสวิตเซอร์แลนด์ที่ใช้รูปทรงปืนM4ในการออกแบบอีกด้วย แนวคิดใช้โครงปืนเดียวกันที่ปรับใช้งานในหลายภารกิจ และรางติดอุปกรณ์เสริมยังถูกนำไปใช้ในงานการออกแบบ SIG551 SIG552 ของสวิตเซอร์แลนด์ และ FN SCAR ของเบลเยียม

ปืนเล็กยาวจู่โจมโครงสร้าง bullpup

ในช่วงทศวรรษ1970-2000 ปืนโครงสร้างแบบ bullpup ได้รับความนิยมในการออกแบบหลายรุ่น เนื่องจากการที่ย้ายชุดรังเพลิงและซองกระสุนไปวางไว้หลังด้ามและไกปืน ทำให้ความยาวโดยรวมของปืนสั้นลงแต่ยังคงความยาวลำกล้องเท่าเดิม ทำให้มีความคล่องตัวในขณะที่ยังคงรักษาระยะหวังผลไว้

Figure 4 MSBS classic and bullpup assault rifle type

ประเทศออสเตรียออกแบบปืน Steyr AUG ซึ่งมีโครงสร้างทำจากพลาสติก รูปทรงโดยรวมค่อนข้างเรียวยาวจากพานท้ายเรียวมาทางด้านปากกระบอกปืน มีด้ามจับและโก่งไกครอบตั้งแต่ส่วนล่างของด้ามจับยาวขึ้นมาเสมอหน้าไก กระโจมมือสามารถมาหักตั้งฉากลงมาสำหรับจับด้านหน้าได้ ในรุ่นแรกมีกล้องเล็งตายตัว

ประเทศอังกฤษและฝรั่งเศสเองก็ทำการพัฒนาปืน bullpup โดยอังกฤษออกแบบปืนรุ่น L85A1ส่วนฐานของปืนเป็นเหลี่ยมตรงป้านออกเล็กน้อยทางด้ายท้ายปืน ศูนย์หลังยกขึ้นสูงคล้ายหูหิ้วปืน M16 กระโจมมือ ด้ามจับ ส่วนปลายของพานท้ายเป็นพลาสติก มีช่องคัดปลอกอยู่ด้านขวา ในขณะที่ฝรั่งเศสพัฒนาปืนรุ่น FAMAS มี

ขนาดในช่วงพานท้ายใหญ่กว่าส่วนกลาง ส่วนศูนย์เล็งยกสูงมีแนวเล็งขนาดใหญ่คล้ายหูหิ้วปืน M16 คันรั้งอยู่ใต้แนวเล็งที่สามารถบริหารกลไกได้ทั้งซ้ายและขวาแต่มีช่องคัดปลอกอยู่ด้านขวาเช่นเดียวกับ L85A1

ประเทศ อิสราเอล เบลเยียม สิงคโปร์ ก็มีการพัฒนาปืนโครงสร้าง bullpup โดยสิงคโปร์นั้นได้ออกแบบและผลิต SAR 21 (Singapore Assault Rifle - 21st Century) มีรูปร่างโค้งมนอิสระค่อนข้างเพรียวบางมีส่วนกระโจมหน้าที่อ้วนและหนากว่าส่วนอื่น ๆ และเรียวลงที่ปลาย มีกล้องเล็งตายตัวคล้ายปืน Steyr AUG คันรั้งอยู่ใต้กล้องเล็งสามารถพับด้านข้างได้คล้ายคันรั้งของ H&K G36

เบลเยียมออกแบบปืน FN F2000 เป็นปืนที่มีลักษณะโค้งมนคล้ายปืนกลมือ FN P90 ด้ามจับและกระโจมมือโค้งรับกับสรีระของมนุษย์ พานท้ายค่อนข้างใหญ่ ด้านบนมีกล้องเล็งที่ยึดกลืนไปกับแนวเส้นสายของปืน แต่เมื่อถอดออกด้านบนจะเป็นมาตรฐานสำหรับติดอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กระโจมมือที่สามารถถอดและติดเครื่องยิงลูกระเบิดเข้าไปแทนที่ได้ คันรั้งอยู่ด้านซ้ายข้างลำตัวปืน ปลอกกระสุนคัดออกด้านหน้าทำให้สามารถใช้งานได้ทั้งมือขวาและมือซ้าย

ก่อนที่ประเทศอิสราเอลจะพัฒนาปืน bullpup ของตนเองได้พัฒนาปืนรูปทรงมาตรฐานรุ่น Galil ที่ออกแบบในช่วงทศวรรษ 1970 ซึ่งได้รับอิทธิพลจากปืน Rk 62 ของฟินแลนด์ผสมผสานกับ AK47 โดยมีกระโจมมือหน้าเป็นไม้หรือพลาสติก พานท้ายสามารถพับด้านข้างได้ ศูนย์หลังถูกวางไว้ท้ายตัวปืน ต่อมาจึงทำการออกแบบและผลิตปืน bullpup รุ่น Tavor โดยเส้นสายตัวปืนค่อนข้างเป็นเหลี่ยมมุม ตลอดแนวบนของปืนมีรางติดอุปกรณ์เหมือนปืน FN SCAR โก่งไกคล้าย Steyr AUG กระโจมมือค่อนข้างสั้นที่ให้ลำกล้องยื่นออกมาค่อนข้างยาว สามารถถอดสลับคันรั้งและช่องคัดปลอกสำหรับผู้ยิงที่ถนัดมือซ้ายได้ กองทัพไทยสั่งซื้อปืนรุ่นนี้เข้ามาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 มีชื่อว่า ปลย.50

ประเทศจีนก็เป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีการพัฒนาปืน bullpup หลังจากที่ผลิตปืนตามแบบสหภาพโซเวียตมาก่อน โดยได้เริ่มพัฒนากระสุนขนาด 8.5× 42มม. ของตนเองขึ้นมาและพัฒนาปืนที่ใช้กระสุนขนาดนี้ด้วย โดยได้พัฒนาปืนโครงสร้าง bullpup ในรุ่น QBZ-95 เข้าประจำการในช่วงปลายทศวรรษที่ 1990 ซึ่งลักษณะทางกายภาพของปืนค่อนข้างเรียบ มีความหนาที่ปลายพานท้าย ศูนย์หน้ายื่นออกมาจากปลายด้านบนของกระโจมมือ มีด้ามจับมือด้านหน้าแบบตั้งฉากโดยมีชิ้นส่วนแนวนอนเชื่อมกับด้ามจับปืนทำหน้าที่เป็นโก่งไกไปในตัว คันรั้งและศูนย์เล็งคล้ายคลึงกับ FAMAS แต่มีขนาดเล็กกว่า

MSBS เป็นปืนของประเทศโปแลนด์ ซึ่งเป็นปืนที่ออกแบบในรูปทรงมาตรฐานและ bullpup พร้อมกัน โดยเริ่มออกแบบในปี 2007 และได้พัฒนาในรุ่น MSBS-5.56S เป็นรูปทรงปืนแบบมาตรฐานมาพร้อมกัน และรุ่น FB MSBS-7.62S และ N โดยเส้นสายของปืนเป็นเส้นตรง มีการหักมุมเหลี่ยมที่ชัดเจน ประกอบด้วยระนาบตรง ไม่ค่อยมีส่วนโค้ง พานท้ายของรุ่นมาตรฐานก็เป็นเส้นตรงมีเหลี่ยมมุมเช่นกัน พานท้ายสามารถพับ ปรับระยะ ปรับระดับรองแก้มได้ โดยระดับพานท้ายเกือบเสมอหลังโครงปืนซึ่งมีรางติดอุปกรณ์ตลอดความยาว กระโจมมือมีช่องระบายความร้อนเป็นช่วง ๆ ตามแนวยาวสามารถติดรางเสริมได้ทั้งรุ่นมาตรฐานและรุ่น bullpup

จากการวิเคราะห์ด้วยหลักสมดุลของน้ำหนักปืนนั้นปืนโครงสร้าง bullpup นั้นก็มีข้อด้อยเรื่องสมดุลปืนเมื่อยิงออกไปเนื่องจากซองกระสุนอยู่ด้านหลังทำให้เมื่อยิงกระสุนออกไปหลายนัดน้ำหนักกระสุน (W) ที่ด้านหลังจะลดลงทำให้สมดุลน้ำหนักปืนที่ด้ามจับ (Rby) และกระโจมมือ (Rbx) เปลี่ยนไป ซึ่งต่างจากปืนโครงสร้าง

มาตรฐานซึ่งมีน้ำหนักปืนทั้งสองตำแหน่งคงที่ ตามภาพที่ 5 นอกจากนี้ระยะพานท้ายยังไม่สามารถปรับระยะให้เหมาะสมกับผู้ยิงได้

Figure 5 Reaction at hand guard and handgrip in Classic and Bullpup type

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของปืนเล็กยาวแบบ STG44 นั้นมีอิทธิพลต่อปืนเล็กยาวจู่โจมรุ่นอื่น โดยเฉพาะในกลุ่มสาย AK ของสหภาพโซเวียต และรูปทรงโดยรวมก็ยังคงเป็นรูปทรงมาตรฐานหลักในการออกแบบปืนหลายกลุ่มไม่ว่าจะเป็นสายเยอรมันเอง หรือในกลุ่มปืนอเมริกันซึ่งภายหลังรูปทรงแบบปืน M4 ของสหรัฐอเมริกาก็ยังมีอิทธิพลต่อการออกแบบรูปลักษณะภายนอกของให้กับปืนบางรุ่น ในขณะที่ปืนที่มีรูปทรงที่โค้งมนเช่น XM8 กลับไม่ได้รับความนิยม จนเมื่อมีกลุ่มปืนโครงสร้างแบบ bullpup จึงเกิดปืนหลากหลายรูปทรงขึ้นในช่วงก่อนปี ค.ศ. 2000

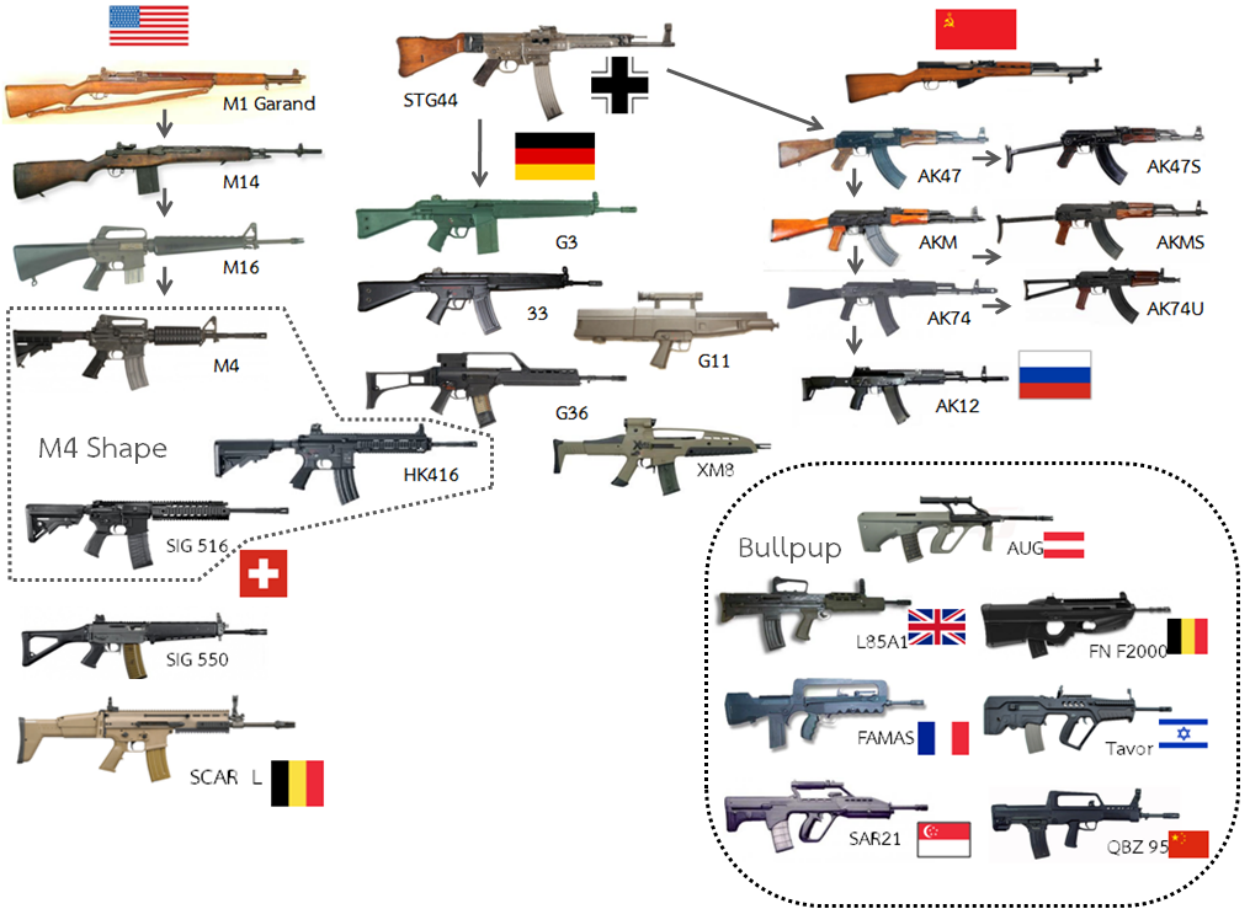


Figure 6 Various of assault rifles

สรุป

1. ด้ามปืนทรงปืนพกนั้นมีลักษณะสำคัญที่เปลี่ยนแปลงทางสัณฐานของปืนเล็กยาวจู่โจมที่ชัดเจน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของด้ามปืนมากว่า 70 ปี

2. ศูนย์เล็งของปืนนั้นในกรณีที่เป็นศูนย์เปิดมักวางตำแหน่งศูนย์หลังให้ห่างจากศูนย์หน้ามากที่สุด นอกจากนี้การยกศูนย์เล็งในปืน M16 ทำให้การออกแบบแนวเล็งไม่จำเป็นต้องให้ผู้ยิงประทับเล็งอิงแนบกับแนวลำกล้อง ส่งผลให้เกิดการใช้อุปกรณ์เล็งแบบอื่น ๆ ทดแทนศูนย์เปิด เช่น กล้องเล็งขยายตายตัว กล้องเล็งแบบสะท้อน ทำให้รางติดอุปกรณ์เอนกประสงค์มีความจำเป็นในปืนเล็กยาวจู่โจมรุ่นใหม่ ๆ

3. ปืนโครงสร้างแบบ bullpup เป็นที่นิยมในการออกแบบโดยเฉพาะในช่วงปี ค.ศ. 1970-2000 ซึ่งมีข้อดีในการลดความยาวปืนแต่คงความยาวลำกล้องไว้ แต่ก็มีข้อด้อยในเรื่องสมดุลปืนและปรับระยะพานท้ายไม่ได้

4. พานท้ายในกลุ่มปืนทรงมาตรฐานนั้นในยุคแรกออกแบบเป็นพานท้ายเต็ม มีปืนในกลุ่มสหภาพโซเวียตที่ใช้การพับเหวี่ยงจะลดความยาวของปืนลงไปได้มาก ในขณะที่ฝั่งสหรัฐอเมริกานิยมใช้พานท้ายที่ยืดหดได้หลายระดับเพื่อระยะประทับเล็งให้เหมาะสมกับสรีระของแต่ละบุคคล ในปืนเล็กยาวจู่โจมรุ่นหลัง ๆ มีการผสมผสานในการออกแบบปืนแบบพับเหวี่ยงข้างปรับระยะและระดับรองแก้มได้เพื่อความเหมาะสมกับผู้ยิง

5. ในด้านเส้นสายและรูปฟอร์มนั้นตั้งแต่เริ่มใช้พลาสติกมาผลิตเป็นโครงปืนจะเห็นได้ว่า นิยมเส้นสายที่โค้งเพรียว เช่น AUG Sar21 XM8 แต่ในยุคหลังนั้นการนิยมเส้นสายที่เป็นเส้นตรงเหลี่ยม มุมชัดเจน เช่น Tavor G36 AK12 MSBS ซึ่งหากพิจารณาตามความรู้สึกของเส้น เส้นตรงจะทำให้เกิดความรู้สึกหนักแน่นมั่นคงมากกว่าโดยเส้นสายตรงและมีเหลี่ยมมุมนั้นจะได้รับความนิยมต่อไป

6. รูปทรงภายนอกมีผลต่อการถูกเลือกใช้งานแม้จะต้องพิจารณาในด้านประสิทธิภาพไปด้วย ซึ่งเห็นได้จาก สหรัฐอเมริกาไม่เลือกใช้งาน XM8 แต่เลือกใช้ H&K416 แม้ว่าจะมีระบบปฏิบัติการเหมือนกัน เนื่องจาก H&K416 ตั้งใจออกแบบให้คล้ายกับปืน M4 และ M16 ที่ทหารสหรัฐอเมริกาคุ้นเคยมากกว่า

7. การออกแบบปืนที่มีโครงปืนเดียวกัน แต่สามารถปรับใช้งานในหลายภารกิจก็ยังเป็นที่นิยมในการออกแบบปืนหลายรุ่น เช่น SCAR G36 H&K416 ทำให้รางติดอุปกรณ์เอนกประสงค์ หรือความสามารถในการติดรางที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะเป็นสิ่งที่ต้องมีในปืนเล็กยาวจู่โจมรุ่นต่อ ๆ ไป

เอกสารอ้างอิง

วอร์ริเออร์หนุ่ม. 2559. ปืนเล็กยาวรุ่นใหม่ ชั้นนำของโลก. **ทหารราบ**ปีที่88 (ฉบับที่ 4/59): หน้า 18-25.

Scott Gourley. 2547. อาวุธสำหรับหน่วยปฏิบัติการพิเศษ. **Popular Mechanics** (ฉบับภาษาไทยเดือนกันยายน): หน้า 76-25.

Chris McNab. 2014. **Schusswaffen: Vom Revolver bis zur Vollautomatik - Modelle aus aller Welt.** Herausgeber, China.

Donald Sommerville. 2011. **An illustrated history of the weapons of world war two**. Southwest, UAE.

โมเดิร์นไฟร์อาร์มส์. 2560. **Assault rifle**. แหล่งที่มา: http://modernfirearms.net/en/, ตุลาคม 2560

Candrsenal. 2017. **Firearm Anatomy**. แหล่งที่มา: http://candrsenal.com/firearm-anatomy-infantry-rifles-of-wwii/,December 2017.

การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกต่อการใช้แสงธรรมชาติภายในอาคารสำนักงาน

The Study of the Effect of Characteristic of Anidolic Lighting System on Daylighting in Office Buildings

เจษสุภา หมั้นทรัพย์[1*] นวลวรรณ ทวยเจริญ[1] และ ศิรเดช สุริต[1]

Jassupa Munsub[1*], Nuanwan Tuaycharoen[1] and Siradech Surit[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกต่อการใช้แสงธรรมชาติภายในอาคารสำนักงาน ที่มีการใช้งานในช่วง 08:00 - 18:00 น. การศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดกรณีศึกษาเป็นห้องทำงานขนาด 4 x 6 เมตร โดยมีความสูงจากพื้นถึงฝ้าเพดาน 3.50 เมตร ภายในห้องจัดตำแหน่งโต๊ะทำงานจำนวน 4 ที่นั่ง ด้านหน้าอาคารเป็นระบบโครงสร้างผนังกระจกเปิดโล่ง ซึ่งหันทางด้านทิศใต้ การศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยตัวแปรต้น 2 ปัจจัย ได้แก่ มุมของตัวรับแสง โดยกำหนดตัวรับแสงทำมุม 0, 30 และ 60 องศา และความกว้างของฝ้าเพดานปล่อยแสงภายใน โดยกำหนดความกว้างตั้งแต่ 1, 1.5 และ 2 เมตร ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม DIALux 4.12 กำหนดท้องฟ้าเป็นลักษณะท้องฟ้าแจ่มใส (clear sky) เพื่อทำการศึกษาปริมาณแสงธรรมชาติทั้งในเรื่องของความส่องสว่างของแสง และความสม่ำเสมอของแสง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในห้องทำงานของอาคารสำนักงาน คือ ระยะช่องเปิดพื้นผิวฝ้าเพดานขนาด 2 เมตร และตัวรับแสงทำมุม 0 องศา

ABSTRACT

The objective of this study was to explore the effect of characteristic of anidolic lighting system on daylighting in office buildings during 08:00 am – 6:00 pm. The study used a case study of office room with 4 x 6 meters with ceiling height 3.50 meters. There are four seats in the room. The front of the room was glass wall facing south. There were two independent variables, which are 1) angle of light receiver varied from 0, 30 and 60 degrees from horizontal and 2) width of the ceiling light diffuser, which are varied from 1, 1.5 and 2 meters. The values of illuminance were simulated uniformly using DIALux 4.12 assuming clear sky condition. The results suggested that the best option for daylighting in office room is anidolic lighting system with light receiver of 0 degrees and 2 meters wide ceiling light diffuser.

Key Words: office building, anidolic lighting, daylight

*Corresponding author; e-mail address: Jassupa.m@ku.th

[1]ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การขยายตัวของจำนวนพื้นที่เชิงพาณิชย์ในปัจจุบันส่งผลให้มีความต้องการใช้พลังงานภายในอาคารเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากวัสดุกรอบอาคารสำนักงานปัจจุบันที่เป็นรูปแบบทันสมัย โดยคุณสมบัติของกระจกที่ใช้เป็นกรอบอาคารจะมีค่าการสะท้อนแสงเพื่อป้องกันแสงแดดและความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร แสงธรรมชาติจึงไม่มีบทบาทให้แสงสว่างในการดำเนินกิจกรรมภายในอาคารภาย และก่อให้เกิดความต้องการใช้พลังงานภายในอาคารโดยพิจารณาจากปริมาณการใช้พลังงานของสำนักงานสถานการณ์พลังงานของประเทศไทย กระทรวงพลังงาน (2557) พบว่า ภาคอาคารและที่อยู่อาศัยมีสัดส่วนการใช้พลังงานมากถึง 15.1% โดยแบ่งสัดส่วนของระบบที่ใช้พลังงานภายในอาคารเป็นระบบแสงสว่างมากถึง 25% เพราะฉะนั้นการออกแบบอาคารที่เชื่อมโยงประโยชน์จากสภาวะแวดล้อมด้วยการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ภายในอาคารจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการลดความต้องการใช้พลังงาน นอกจากการลดการใช้พลังงานด้วยการเปลี่ยนการดำเนินกิจกรรมภายในอาคาร

ระบบควบคุมแสงแอนิโดลิก (anidolic lighting system) เป็นระบบที่เป็นการนำแสงสว่างธรรมชาติมาใช้ภายในอาคาร โดยด้วยตัวรับแสง (light receiver) ที่ทำมุมเอียงเพื่อรับแสงผ่านช่องเปิดด้านหน้าของอาคารและส่งผ่านและสะท้อนไปตามช่องระหว่างฝ้าเพดาน โดยแสงที่ถูกส่งผ่านดังกล่าวจะถูกปล่อยมาบริเวณช่องปล่อยแสงบริเวณฝ้าเพดาน (ceiling light diffuser) การนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคารโดยวิธีการดังกล่าวจะไม่ปิดบังทัศนียภาพทั้งภายในและภายนอกอาคาร และจะสามารถก่อให้เกิดความส่องสว่างด้านในของห้องได้ ในขณะเดียวกันปริมาณความร้อนที่จะเข้ามาพร้อมกับแสงธรรมชาติจะลดลงเนื่องจากการสะท้อนภายในช่องฝ้าเพดาน ดังแสดงใน Figure 1

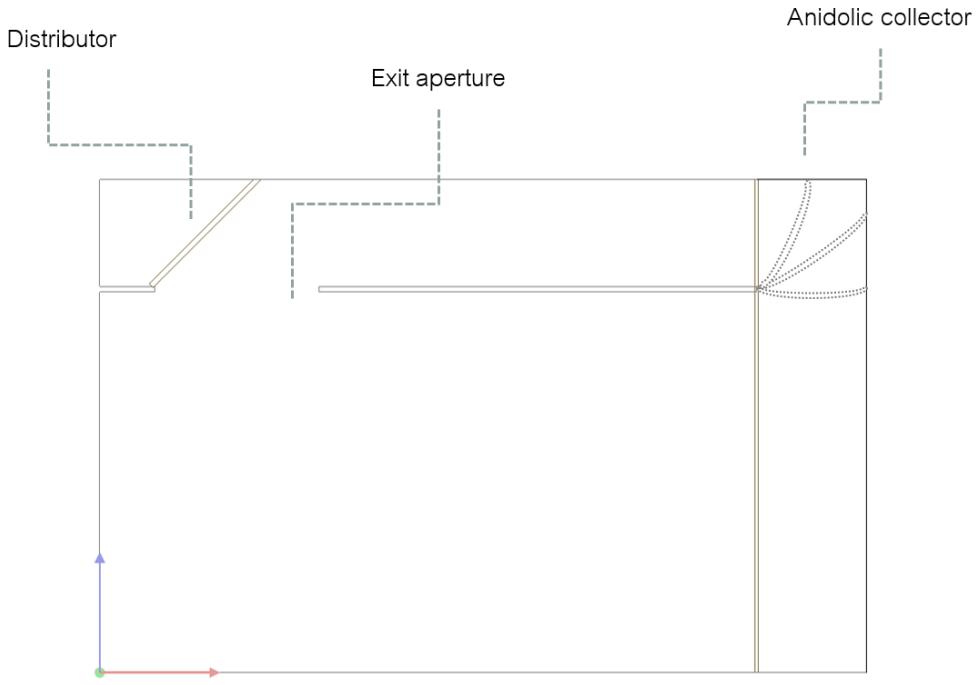


Figure 1 Section of anidolic lighting system.

การศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกต่อการใช้แสงธรรมชาติภายในอาคารสำนักงาน เพื่อเป็นแนวทางการใช้ระบบดังกล่าวกับอาคารสำนักงานที่มีรูปแบบคล้าย ๆ กันเพื่อการประหยัดพลังงานในอาคารต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

รายละเอียดกรณีศึกษา

ห้องที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาด 4 x 6 เมตร โดยมีระยะฝ้าเพดานสูง 3.50 เมตร เป็นการจำลองขนาดห้องทำงานที่จัดตำแหน่งโต๊ะทำงานจำนวน 4 ที่นั่ง (Neufert and Neufert, 2012) ด้านหน้าอาคารเป็นระบบโครงสร้างผนังกระจกเปิดโล่งหันทางด้านทิศใต้ ซึ่งเป็นทิศที่ได้รับอิทธิพลจากดวงอาทิตย์นานกว่าทิศอื่น ๆ ผนังก่ออิฐฉาบปูนทาสี รูปแบบและคุณลักษณะของห้องกรณีศึกษา ดังแสดงใน Figure 2 และ Figure 3

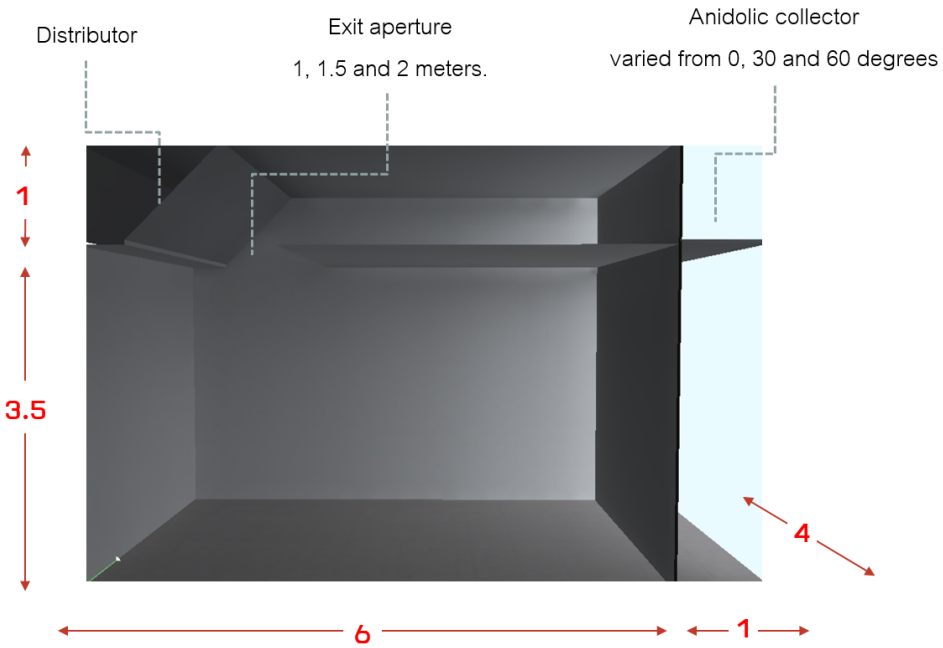


Figure 2 The case study in this study was assigned to be a working room section.

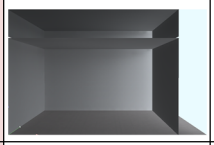
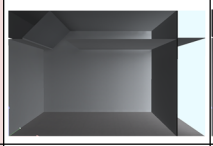
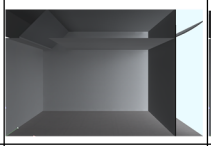
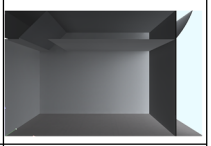
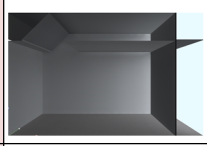
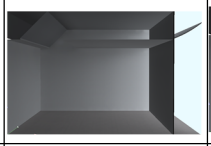
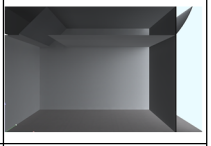
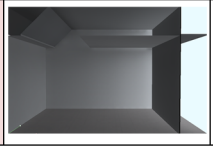
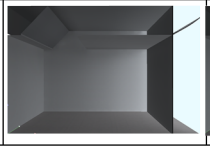
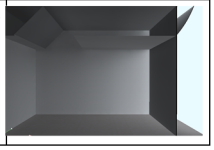
Anidolic collector (x°) / Exit aperture (m)	0° (0 degree)	30° (30 degrees)	60° (60 degrees)
Exit aperture 0 m (E0)			
Exit aperture 1 m (E1)			
Exit aperture 1.5 m (E1.5)			
Exit aperture 2 m (E2)			

Figure 3 Anidolic lighting system tested in this study.

ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1: ทบทวนวรรณกรรมและข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแสงแอนิโดลิก ทฤษฎีพื้นฐานของแสงสว่างภายในอาคาร

ขั้นตอนที่ 2 : การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อระบบควบคุมแสงแอนิโดลิก โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

ตัวแปรต้น ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย 2 ปัจจัย คือ มุมของตัวรับแสง โดยกำหนดตัวรับแสงทำมุม 0 30 และ 60 องศา และ ความกว้างของฝ้าเพดานปล่อยแสงภายใน โดยกำหนด 1 1.5 และ 2 เมตร เหตุผลในการศึกษาปัจจัยดังกล่าวเนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีการศึกษาค่อนข้างมากในการศึกษาต่างประเทศ (Mohsen Roshan, Aliyu Salisu Barau, 2016) โดยรูปแบบทั้งหมดของระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกที่ทำการทดสอบดังแสดงใน Table 1

Table 1 Ten cases of anidolic lighting system tested in this study

No.	Patterns	Collector Outside	Distributor Inside	Exit aperture
1	D0,E0[1/]	-	-	-
2	D0,E1	0^{o}	45^{o}	1
3	D0,E1.5	0^{o}	45^{o}	1.5
4	D0,E2	0^{o}	45^{o}	2
5	D30,E1[2/]	30^{o}	45^{o}	1
6	D30,E1.5	30^{o}	45^{o}	1.5
7	D30,E2	30^{o}	45^{o}	2
8	D60,E1[3/]	60^{o}	45^{o}	1
9	D60,E1.5	60^{o}	45^{o}	1.5
10	D60,E2	60^{o}	45^{o}	2

1/ D0,E0 = Collector 0 degree, Distributor 0 degree, Exit aperture 0 meter.

2/ D30, E1.5 = Collector 30 degree, Distributor 45 degrees, Exit aperture 1.5 meters.

3/ D60, E2 = Collector 60 degree, Distributor 45 degrees, Exit aperture 2 meters.

ตัวแปรตาม การศึกษาประกอบด้วย 2 ปัจจัย คือ ค่าความส่องสว่างและค่าความสม่ำเสมอของแสง

ขั้นตอนที่ 3 : การทำการจำลองห้องทำงานด้วยใช้โปรแกรม DIALux 4.12 โดยการเลือกใช้ท้องฟ้าเป็นลักษณะท้องฟ้าแจ่มใส (clear sky) เนื่องจากเป็นสภาพท้องฟ้าที่ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านแสงสว่างมากที่สุด และกำหนดช่วงในการตรวจวัดค่าความส่องสว่างและค่าความสม่ำเสมอของแสง ตั้งแต่เวลา 8:00 น. - 18:00 น. และจำลองทั้งหมด 3 วัน คือ วันที่ 21 มีนาคม 2560 (equinox) วันที่ 21 มิถุนายน 2560 (summer solstice) และวันที่ 21 ธันวาคม 2560 (winter solstice) ทำการตรวจวัดในระนาบนอนทุก ๆ ระยะ 2 เมตร (horizontal illuminance)

ขั้นตอนที่ 4 : นำผลการทดลองที่ได้ มาสรุปผลระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกที่ดีที่สุดรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในห้องทำงานของอาคารสำนักงาน โดยพิจารณาค่าความส่องสว่างและค่าความสม่ำเสมอของแสงที่ความสูงระดับการใช้งานในห้องทำงานที่ระดับ 0.75 เมตร จากพื้น โดยการจำลองตำแหน่งของดวงอาทิตย์ทุก ๆ 2 ชั่วโมง โดยนำค่าความส่องสว่างมาเฉลี่ยทั้งปีและนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน 500 lux (CIBSE, 1994) หากค่าความส่องสว่างหลายรูปแบบเกินเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าวจะพิจารณาค่าความสม่ำเสมอของแสงที่สูงที่สุดเป็นรูปแบบที่ดีที่สุด

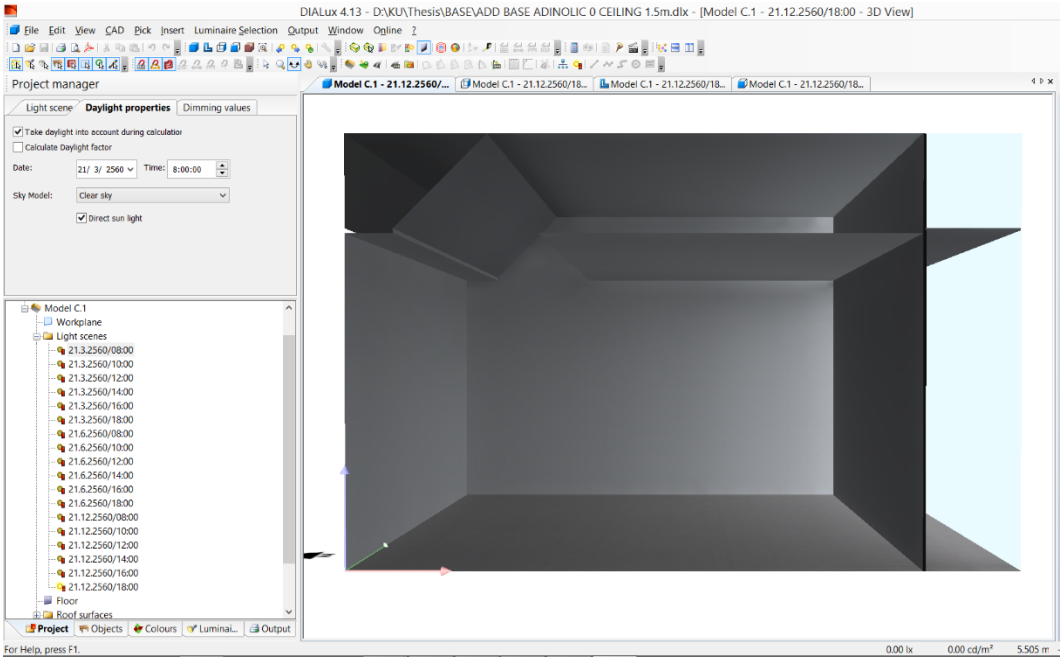


Figure 4 Light scenes in DIALux 4.12

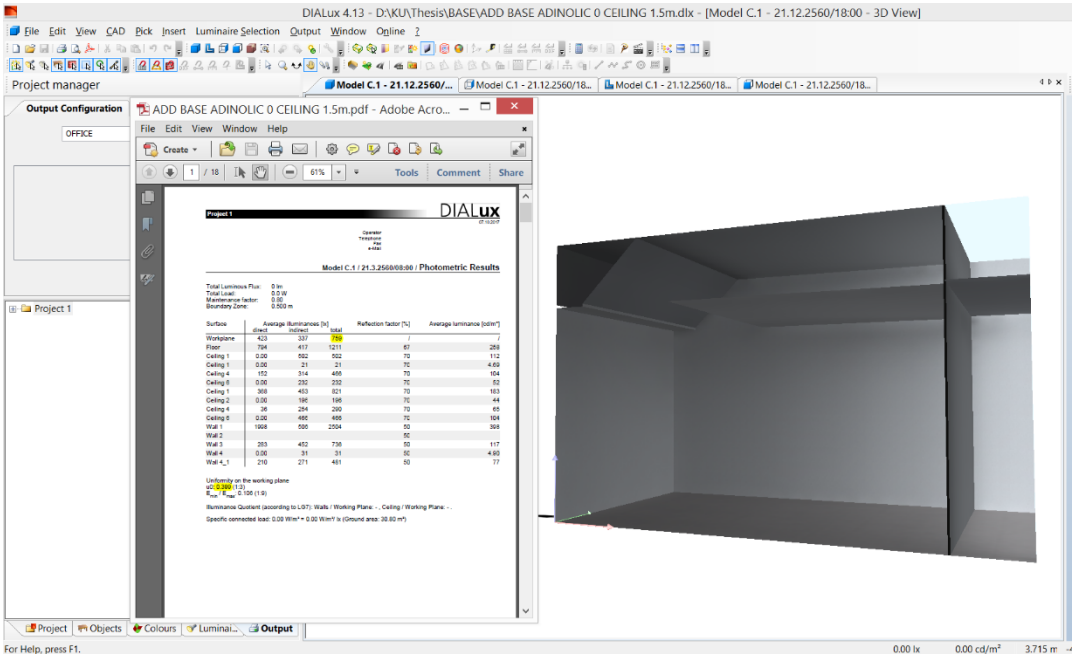


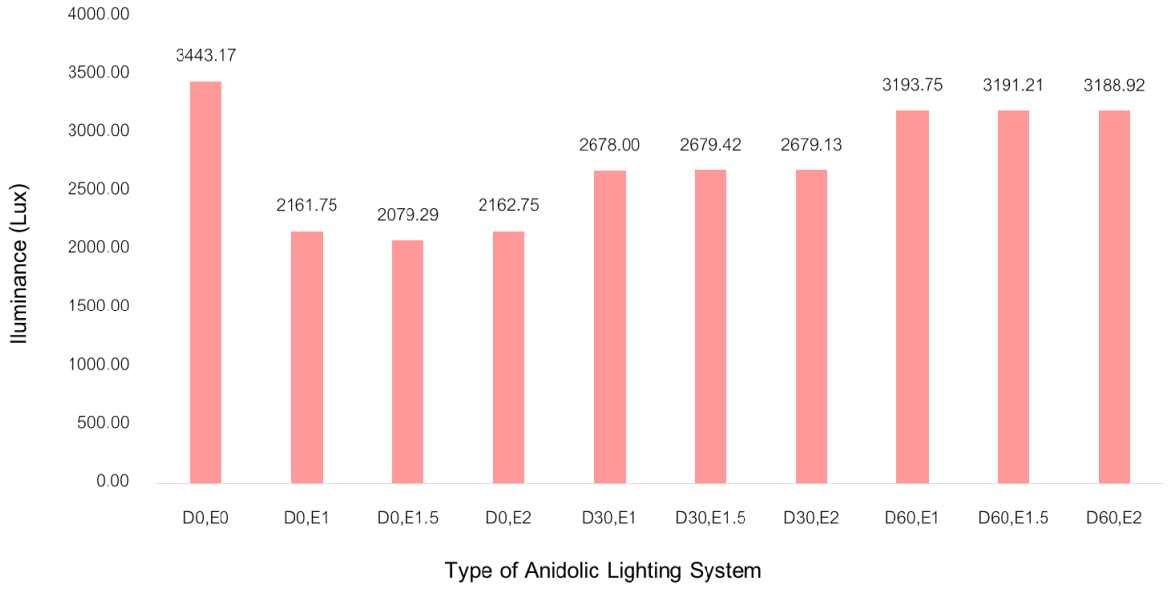
Figure 5 Output configuration in DIALux 4.12

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีของห้องทำงาน (Lux) จากรูปแบบต่าง ๆ ของระบบควบคุมแสงแอนิโดลิก

Chart 1 แสดงค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีของห้องทำงาน (lux) จากรูปแบบต่างๆ ของระบบควบคุมแสงแอนิโดลิก ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การติดระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกในห้องสำนักงานไม่ว่ารูปแบบใด จะมีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีเกินค่ามาตรฐานทั้งหมด โดยค่าความส่องสว่างที่สูงสุดคือ รูปแบบ D0 E0 โดยมีความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปี 3,443.16 lux และความส่องสว่างที่ต่ำสุดคือรูปแบบ D0 E1.5 โดยมีความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปี 2,079.29 lux เนื่องจากค่าความส่องสว่างเฉลี่ยทั้งปีเกินมาตรฐานความส่องสว่างทุกรูปแบบ การศึกษาครั้งนี้จึงพิจารณาค่าความสม่ำเสมอของแสงที่สูงที่สุดเป็นเกณฑ์

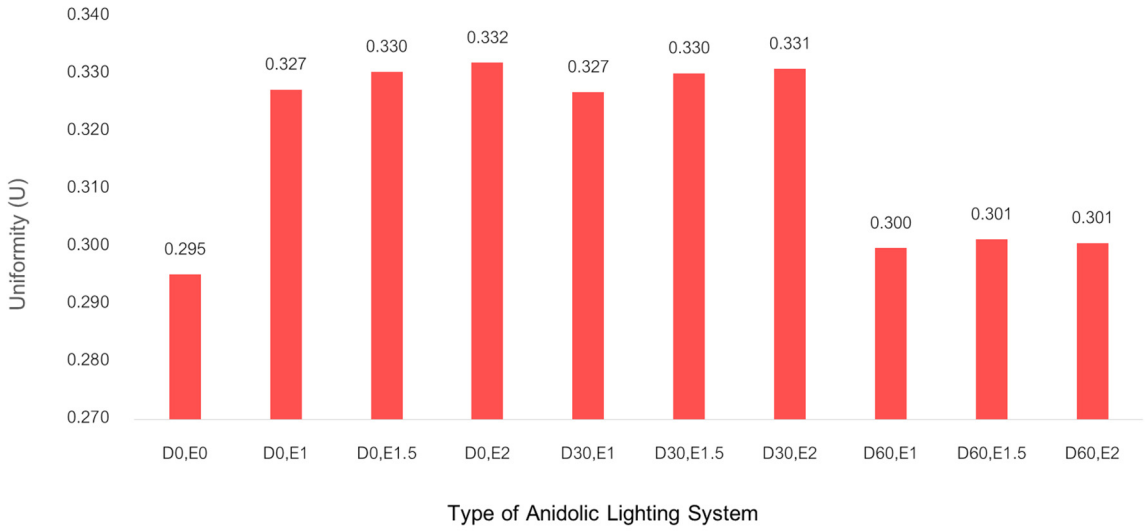
Chart 1 The average annual illuminance (lux) of anidolic lighting system.



ผลการศึกษาค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีของห้องทำงานจากรูปแบบต่าง ๆ ของระบบควบคุมแสงแอนิโดลิก

Chart 2 แสดงค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยทั้งปีของห้องทำงานจากรูปแบบต่าง ๆ ของระบบควบคุมแสงแอนิโดลิก ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การติดระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกในห้องทำงานที่มีค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยสูงที่สุด คือ รูปแบบ D0 E2 โดยมีค่า 0.332 และค่าความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยต่ำที่สุด คือรูปแบบ D0 E0 โดยมีค่า 0.295

Chart 2 The average annual uniformity (U) of anidolic lighting system.



ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงสรุปได้ว่า รูปแบบระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกที่เหมาะสมที่สุดในการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในห้องทำงานของอาคารสำนักงาน คือ รูปแบบ D0 E2 ซึ่งเป็นระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกที่มีตัวรับแสงทำมุม 0 องศา และมีระยะช่องเปิดพื้นผิวฝ้าเพดานขนาด 2 เมตร

สรุป

การศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกต่อการใช้แสงธรรมชาติภายในอาคารสำนักงาน การศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยตัวแปรต้น 2 ปัจจัย ได้แก่ 1) มุมของตัวรับแสง โดยกำหนดตัวรับแสงทำมุม 0, 30 และ 60 องศา และ 2) ความกว้างของฝ้าเพดานปล่อยแสงภายในโดยกำหนด 1, 1.5และ 2 เมตร การศึกษาครั้งนี้ทำการจำลองค่าความส่องสว่างและค่าความสม่ำเสมอของแสงของห้องทำงานโดยใช้โปรแกรม DIALux 4.12 โดยกำหนดท้องฟ้าเป็นลักษณะท้องฟ้าแบบแจ่มใส ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในห้องทำงานของอาคารสำนักงาน คือ ระบบควบคุมแสงแอนิโดลิกที่มีตัวรับแสงทำมุม 0 องศา และมีระยะช่องเปิดพื้นผิวฝ้าเพดานขนาด 2 เมตร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นวลวรรณ ทวยเจริญ และดร. ศิรเดช สุริต ผู้ให้คำปรึกษาต่าง ๆ และแบ่งปันประสบการณ์ความรู้ตั้งแต่เริ่มต้นโครงการ และขอขอบพระคุณครอบครัว สมาชิก MBIT ทุกคนรวมถึงผู้เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงพลังงาน. 2557. **สถิติพลังงานรายปี**. แหล่งที่มา: http://www.energy.go.th/?q=node/315, 10 ธันวาคม 2560

Mohsen Roshan, Aliyu Salisu Barau. 2016. Assessing Anidolic Daylighting System for efficient daylight in open plan office in the tropics. **Journal of Building Engineering** 8: 58-69.

Ernt Neufert and Peter Neufert. 2012. **Architects' Data**, Fourth Edition. Wiley-Blackwell.

CIBSE. (1994). **Code for Interior Lighting**. London: CIBSE.

การพัฒนา SMEs ด้านโลจิสติกส์การเกษตรสู่การเป็นเศรษฐกิจสีเขียว (กรณีศึกษาผู้ประกอบการผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า: กลุ่มจังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน 1)

Development of SMEs of Agricultural Green Logistics for Green Economy (A Case Study of Fabric-Textile Enterprises: Upper North-Eastern Province Cluster 1)

ณัชชา สมจันทร์[1*] และ ภควดี ศิริหล้า[1]

Natcha Somjan[1*] and Pakawadee Sirilar[1]

บทคัดย่อ

การพัฒนา SMEs ด้านโลจิสติกส์การเกษตรสู่การเป็นเศรษฐกิจสีเขียว (กรณีศึกษาผู้ประกอบการผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า: กลุ่มจังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน 1) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณด้วยสถิติพรรณนา วิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบ ผลการวิจัย พบว่า 1) ผู้ประกอบการผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า สามารถจำแนกกลุ่มตามศักยภาพ จำนวน 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 กลุ่มที่มีศักยภาพทางการส่งออก การตลาด และการออกแบบ กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่มีศักยภาพทางการเชื่อมโยงผู้ผลิตวัตถุดิบ และกลุ่มที่ 3 กลุ่มที่มีศักยภาพทางกรรมวิธีการผลิตแบบท้องถิ่นดั้งเดิม 2) ผู้บริโภค มีความต้องการที่เกี่ยวข้องกับผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้าที่สำคัญ จำนวน 3 ด้าน ได้แก่ ด้านการแต่งกายด้วยเสื้อผ้าสำเร็จรูป ด้านการออกแบบให้โดดเด่นทันสมัย คงเอกลักษณ์ของท้องถิ่น และด้านการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และ 3) ปัจจัยสำคัญที่จะใช้ขับเคลื่อนการจัดการโลจิสติกส์สีเขียว สามารถจัดกลุ่มได้ 3 ด้าน ได้แก่ ปัจจัยด้านการจัดการองค์กรและวัตถุดิบ ปัจจัยด้านอาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม และปัจจัยด้านพลังงานและระเบียบปฏิบัติ

ABSTRACT

Development of SMEs of agricultural green logistics for green economy (A Case study of fabric-textile enterprises: upper North-Eastern province cluster 1). Quantitative data analysis was determined. And factor analysis was conducted to determine. The results revealed that 1) the evaluation of fabric textile enterprises' potential and fabric textile products composed of three groups: group 1 was the enterprises that had the ability of exporting, marketing, and designing, group 2 was the enterprises that had the ability of networking among fabric textile producers, and group 3 was the local enterprises that used traditional method to produce. 2) The study of customers' demands found that the use of fabric textile for garments was popular and there were needed in design which contained the signature of local together with nature friendly and fashionably. 3) The analyze of green economic standardize creating to be SMEs were three factors: organization and material, vocational healthy and environment, energy, and regulation.

Keywords: Fabric-textile enterprises, Green logistics, Green economy, Factors, Standard

*Corresponding author: e-mail address:natcha.maikami@gmail.com

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย เลย 42000

[1]Program of Production Engineering, Faculty of Industrial Technology, Loei Rajabhat University, Loei 42000

คำนำ

เศรษฐกิจสีเขียว (Green economy) เป็นแนวคิดในการพัฒนาเศรษฐกิจที่ใส่ใจกับสิ่งแวดล้อม โดยรูปแบบเศรษฐกิจมุ่งหวังเพื่อส่งเสริม สุขภาวะของมนุษย์ให้ดีขึ้น มีความยุติธรรมทางสังคม ลดความเสี่ยงทางสิ่งแวดล้อมพร้อมกับแก้ไขปัญหาความขาดแคลนทางนิเวศ (ปรีชา และชัยณรงค์, 2558) ต่างเป็นกระแสที่ทำให้ทุกๆ ฝ่ายเกิดการตื่นตัวในการอนุรักษ์ธรรมชาติ และรับผิดชอบต่อสังคม ส่งผลให้กลายเป็นปัจจัยสำคัญที่ผู้บริโภคนำมาเลือกสินค้าโดยจะหันมาซื้อสินค้าที่มีส่วนอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม หรือ ผลิตภัณฑ์สีเขียวมากขึ้น (ธันยมัย, 2557) ส่งผลให้ภาคธุรกิจโดยเฉพาะธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อมต้องเร่งปรับตัวในการดำเนินธุรกิจที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสร้างเครือข่ายด้านโลจิสติกส์สีเขียวไปประยุกต์ใช้ในองค์กรเพื่อสร้างความยั่งยืนต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับด้านโลจิสติกส์การเกษตรและเศรษฐกิจสีเขียวส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปในด้านสิ่งแวดล้อม อาทิ การพัฒนาสิ่งทอสีเขียว (Green textile) (Moreira *et al*., 2015) โดยใช้กระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์แบบบูรณาการตลอดห่วงโซ่อุปทานทั้งระบบ ตั้งแต่ผู้บริโภคสุดท้าย ผู้จัดหาวัตถุดิบตลอดจนชุมชนท้องถิ่นที่เกี่ยวข้อง ด้วยวิธีการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco-design) ร่วมกับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Life cycle assessment: LCA) ตามมาตรฐาน ISO 14040: 2006 และ ISO 14044: 2006 กระบวนการออกแบบทั้งระบบดังกล่าวจะเป็นวิธีการที่สามารถระบุปัจจัยที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ในแต่ละกระบวนการและนำไปสู่การลดการปลดปล่อยของเสียเป็นศูนย์ (Zero emission) ทั้งนี้ปัจจัยที่มีส่วนสำคัญในการตัดสินใจเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบสีเขียว (Green supplier) (Gurel *et al*., 2015) เพื่อร่วมเป็นพันธมิตรในกระบวนการพัฒนาสินค้า ประกอบด้วย ราคา การจัดส่ง คุณภาพ การบริการ พันธมิตร การควบคุมมลพิษ ผลิตภัณฑ์สีเขียวและการจัดการสิ่งแวดล้อม โดยเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเศรษฐกิจสีเขียวทั้งทางตรงและทางอ้อม อย่างไรก็ตามการจัดการโลจิสติกส์สีเขียว (Green logistics management: GLM) (Lai and Wong, 2012) นับเป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญต่อการสร้างกำไรของผู้ประกอบการ ส่วนบทบาทการทำงานร่วมกันของห่วงโซ่คุณค่าสีเขียว (Green supply chain: GSC) (Ramanathan e*t al*, 2014) พบว่า เกิดจากแรงกดดันของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย อาทิ รัฐและผู้จัดหาวัตถุดิบที่มีต่อการประสานความร่วมมือของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่าย ทำให้ส่งผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิต ความสำคัญอีกประการหนึ่ง คือ ระบบสารสนเทศโลจิสติกส์สำหรับการเกษตร (Agricultural logistics information system) (Perdana, 2012) เพื่อการเพิ่มผลิตภาพและการตรวจสอบความเคลื่อนไหวของชุมชนการเกษตรทุกระดับเพื่อความได้เปรียบเชิงแข่งขัน

จากการทบทวนวรรณกรรมอาจกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้โซ่อุปทานและโลจิสติกส์สีเขียวในระดับภูมิภาค ยังขาดการศึกษาถึงการบูรณาการระหว่างความสามารถของผู้ผลิตและความต้องการของผู้บริโภค ดังนั้นงานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ศึกษาศักยภาพผู้ประกอบการร่วมกับการศึกษาความต้องการของผู้บริโภค นำไปสู่การจัดทำมาตรฐานโลจิสติกส์สีเขียวสู่การเป็นเศรษฐกิจสีเขียว เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ประกอบการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลง ตามปัจจัยมาตรฐานภายใต้เศรษฐกิจสีเขียว ต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ เป็นการวิจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ มีประชากรในการศึกษาวิจัย คือ ผู้ประกอบการผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน 1 จำนวน 5 จังหวัด บึงกาฬ หนองคาย หนองบัวลำภู เลย และอุดรธานี ที่ผ่านการรับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ที่ทำการผลิตผ้าจากวัตถุดิบที่ใช้ประเภทฝ้าย ไหม หรือวัสดุอื่นร่วม คัดเลือกโดยการสุ่มตามความสะดวก จำนวน 56 ราย ผู้บริโภคคัดเลือกโดยการสุ่มแบบบังเอิญจากผู้บริโภคที่ซื้อสินค้า ณ บูธนิทรรศการหรือหน้าร้านของผู้ประกอบการ จำนวน 160 ราย และผู้เชี่ยวชาญทางด้านโลจิสติกส์การเกษตร จำนวน 5 ราย เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ แบบสอบถามศักยภาพของผู้ประกอบการและความต้องการผู้บริโภค ทดสอบค่าความเชื่อมั่นด้วยวิธีหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟา (Alpha coefficient) โดยมีค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม เท่ากับ 0.953 และ 0.889 และแบบสัมภาษณ์แนวทางการพัฒนาผู้ประกอบการของผู้เชี่ยวชาญ เป็นแบบสัมภาษณ์แบบมีโครงสร้างด้านความสำคัญของการสร้างธุรกิจสีเขียว การยอมรับของผู้บริโภค การจัดการสิ่งแวดล้อม การบริหารจัดการเพื่อชุมชน และแนวทางมาตรฐานการพัฒนาผู้ประกอบการสีเขียว และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows ใช้สถิติพรรณนาในการหาค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor analysis) เพื่อจัดกลุ่มปัจจัยที่เป็นแรงขับเคลื่อนในการประยุกต์ใช้การจัดการโลจิสติกส์สีเขียวของผู้ประกอบการ

ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาข้อมูลอุตสาหกรรมผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า พบว่า อุตสาหกรรมแบ่งเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย 1) อุตสาหกรรมต้นน้ำ ประกอบด้วย การเพาะปลูกวัตถุดิบ การดูแลรักษา การแปรรูป และการผลิตเส้นใย ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ผู้ผลิตเส้นใยแบบดั้งเดิมและผู้ผลิตเส้นใยแบบอุตสาหกรรมสมัยใหม่ 2) อุตสาหกรรมกลางน้ำ ประกอบด้วย การปั่นด้าย การทอผ้า การถักผ้า การฟอก-ย้อม-แต่งสี เพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตผ้าผืน ด้วยกรรมวิธีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่ลักษณะประเภทของผ้า เช่น ผ้ามัดหมี่ ผ้ายกดอก และผ้าขิด มีการใช้สารเคมีและสีสังเคราะห์ร่วมกับการย้อมสีธรรมชาติ และ 3) อุตสาหกรรมปลายน้ำ ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ผ้าผืนและผลิตภัณฑ์แปรรูปจากผ้า สามารถสร้างมูลค่าเพิ่ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ คุณภาพวัตถุดิบ คุณภาพแรงงาน ที่สอดคล้องกับความต้องการของตลาด งานวิจัยนี้เป็นการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องตลอดห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า การจัดการห่วงโซ่อุทานต่อการพัฒนาศักยภาพของผู้ประกอบการในปัจจุบันมีความหมายที่เปลี่ยนแปลงจากอดีต โดยได้ครอบคลุมเรื่องโลจิสติกส์ ซึ่งประกอบด้วยกิจกรรมการบริหารจัดการด้านการผลิต การแปรรูป และการกระจายสินค้าให้มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีคุณภาพตามความต้องการของผู้บริโภค การบริหารจัดการมีลักษณะเป็นห่วงโซ่เชื่อมโยงผู้เกี่ยวข้องตั้งแต่การผลิตในระดับต้นน้ำ ระดับกลางน้ำ และในระดับปลายน้ำ

ผลการศึกษาศักยภาพผู้ประกอบการผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า กลุ่มภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน พบว่า ลักษณะธุรกิจทั้งหมดเป็นผู้ดำเนินการทอผ้าและรวบรวมผ้าจากชุมชนเพื่อดำเนินการเชิงพาณิชย์ และมีธุรกิจศักยภาพด้านอายุแรงงานระหว่าง 31-50 ปี (ร้อยละ 51.8) เป็นช่วงอายุที่มีความเชี่ยวชาญและสามารถรับทักษะการผลิตสมัยใหม่เข้ามาประยุกต์ใช้ได้หากมีการเพิ่มผลผลิตหรือสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับการผลิตได้

ช่องทางการจำหน่ายหลักในงานจัดแสดงสินค้า (ร้อยละ 50.0) ส่งออกต่างประเทศ (ร้อยละ 39.2) การจัดจำหน่ายที่จะสามารถนำไปสู่การส่งออกสินค้ายังต้องพึ่งพาการจัดแสดงสินค้าในเขตเมืองใหญ่ โดยผู้ซื้อจากต่างประเทศจะพบปะผู้ขายที่มีศักยภาพจนสามารถมีโอกาสในการสร้างเครือข่ายและนำไปสู่การปิดการขายได้ มียอดขายเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 53.6) แสดงให้เห็นถึงการขยายฐานลูกค้า ขยายฐานตลาด หรือขยายฐานการผลิต ที่มีแนวโน้มในการพัฒนาด้านการตลาดเป็นอย่างดี มีการวางแผนกลยุทธ์สีเขียวในระยะ 3-5 ปี (ร้อยละ 82.1) มีการเพิ่มศักยภาพด้านการตลาด (ร้อยละ 67.9) มีการปรับปรุงกระบวนผลิต (ร้อยละ 44.6) ผู้ประกอบการประเมินความสามารถทางภาษา (ร้อยละ 39.3) ผู้ประกอบการมีความรู้เกี่ยวกับการผลิตสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (ร้อยละ 42.9) และมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลด้านเศรษฐกิจสีเขียว (ร้อยละ 58.9) ผลการวิเคราะห์ความพร้อมของระดับกลยุทธ์ที่พร้อมรองรับต่อการเปลี่ยนแปลงต่อปัจจัยภายนอก อยู่ในระดับปานกลาง ($\overline{X}$ = 3.40, S.D.=0.92) ผู้ประกอบการมีการเตรียมความพร้อมด้านจิตตระหนักต่อการผลิตที่มีจรรยาบรรณรักษ์โลก นำไปสู่การสร้างเศรษฐกิจสีเขียวในกลุ่มผู้ผลิตผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า พร้อมทั้งมีการวางแผนการปรับตัวต่อพลวัตที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ผลการวิเคราะห์ศักยภาพของผู้ประกอบการ ทั้งภาพรวมของกิจการ การผลิต การตลาด บุคลากร กลยุทธ์ขององค์กร และระดับศักยภาพของผู้ประกอบการต่อปัจจัยสำคัญในการยกระดับศักยภาพที่พร้อมต่อการเปลี่ยนแปลงไปสู่เศรษฐกิจสีเขียวทั้งระบบห่วงโซ่อุปทาน พบว่า บริบทของอุตสาหกรรมมีการเปลี่ยนแปลงของห่วงโซ่อุปทานจากระบบดั้งเดิมมาสู่ระบบห่วงโซ่สมัยใหม่ ดังนี้ 1) ผู้ประกอบการผ้าที่มีศักยภาพด้านการส่งออก การตลาด และการออกแบบ จะเป็นผู้ริเริ่มหรือมองเห็นความต้องการของผู้บริโภคในตลาดต่างประเทศ ความสำเร็จเกิดจากการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้าสู่กระบวนการผลิต ทำให้จำหน่ายสินค้าได้ในราคาสูง 2) ผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็กที่มีศักยภาพรองลงมาจะเป็นผู้เชื่อมโยงผู้ผลิตกลางน้ำและปลายน้ำ และบูรณาการภูมิปัญญาท้องถิ่นร่วมกับการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ และสามารถสร้างทางเลือกการเข้าถึงลูกค้าหลายกลุ่ม และ 3) ผู้ประกอบการกลุ่มอนุรักษ์นิยม จะยังคงกรรมวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมโดยมุ่งเน้นการอนุรักษ์ ฟื้นฟู และสืบสานการทอและลายผ้า และยังขาดองค์ความรู้ทางการตลาดและการคำนวณต้นทุนการผลิต

ผลการศึกษาข้อมูลความต้องการของผู้บริโภค พบว่า ผู้บริโภคที่ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 73.1) อายุระหว่าง 31-60 ปี (ร้อยละ 83.8) ประกอบอาชีพธุรกิจส่วนตัว (ร้อยละ 61.3) การศึกษาต่ำกว่าปริญญาตรี (ร้อยละ 50.6) และมีรายได้ 10,001-20,000 บาท (ร้อยละ 35.3) ผลการศึกษาพฤติกรรมของการซื้อผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า พบว่า ผู้บริโภคส่วนใหญ่ซื้อเสื้อผ้าสำเร็จรูป (ร้อยละ 46.9) นิยมผ้าฝ้าย (ร้อยละ 65.0) โดยส่วนใหญ่รับรู้ข้อมูลผลิตภัณฑ์ผ้าจากศูนย์จำหน่ายสินค้าพื้นเมือง (ร้อยละ 48.8) มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ส่วนตัว (ร้อยละ 51.9) ซึ่งมักจะเป็นการซื้อจากบูธนิทรรศการแสดงสินค้าเป็นหลัก (ร้อยละ 51.2) ราคาเฉลี่ย/ครั้ง 1,0001-5,000 บาท (ร้อยละ 40.6) และมีความชื่นชอบลักษณะของผ้าและผลิตภัณฑ์ผ้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (ร้อยละ 31.9) ผลการวิเคราะห์ปัจจัยด้านส่วนประสมการตลาดที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อ พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภคผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้าภาพรวม อยู่ในระดับมาก ($\overline{X}$ =4.03, S.D.=0.70) ข้อเสนอแนะความต้องการของผู้บริโภค ด้านผลิตภัณฑ์ : ประกอบด้วยการผลิตเส้นใยธรรมชาติ ควรเพิ่มความละเอียดของเส้นด้ายให้มีเนื้อผ้านิ่มขึ้น เนื้อผ้าเบา สวมใส่สบาย และคงทนเมื่อทำการซักทำความสะอาด กระบวนการย้อมสีควรมีเฉดสีของผ้าให้เลือกมากขึ้น การพัฒนาน้ำด่างและวัตถุดิบธรรมชาติ

ที่มีการหมุนเวียน เช่น ใบ หรือดอก คุณภาพและมาตรฐาน ผ่านการรับรองมาตรฐานจากหน่วยงานภาครัฐหรือเอกชนที่มีมาตรฐานการรับรอง มีสีสันตามสมัยนิยม ความคงทนของสีและความคงทนต่อเหงื่อ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ใช้เส้นใยเป็นทางเลือกในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ด้านการแพทย์ ด้านราคา : การกำหนดราคาควรให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ เป็นราคาที่สามารถเข้าถึงได้ (ไม่สูงมากนัก) มีความคุ้มค่ากับเงินที่ลูกค้าจ่ายไป และผู้ประกอบการควรตอบแทนสังคมจากผลกำไรด้วย ด้านช่องทางการจัดจำหน่าย : การกระจายผลิตภัณฑ์ ทำเครือข่ายร่วมกับบริษัทขนส่งหรือบริษัททางการตลาด ด้านส่งเสริมการตลาด : กิจกรรมอนุรักษ์ธรรมชาติ การส่งเสริมภูมิปัญญาท้องถิ่น การฟื้นฟูลายผ้าโบราณของแต่ละท้องถิ่น เพื่อจัดทำเป็นรูปเล่มและบันทึกประวัติศาสตร์ ปลูกพืชทดแทนที่ตัดไปเป็นวัตถุดิบในการย้อม การให้ข้อมูลแก่ลูกค้า การให้ข้อมูลที่ถูกต้อง ควรมีเรื่องราวของหรือที่มาของวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ จากการวิเคราะห์ความต้องการของผู้บริโภคเพื่อพัฒนาผู้ประกอบการสีเขียว พบว่า ต้องเพิ่มเทคโนโลยีหรือทักษะด้านการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีความหลากหลายเพื่อให้ผู้บริโภคได้เข้าถึงและคุ้มค่ากับเงินที่ซื้อสินค้า และพัฒนาช่องทางการเข้าถึงสินค้าให้มากขึ้น รวมถึงการส่งเสริมเครือข่ายผ้าทอมือจากภูมิปัญญาและชุมชน

ผลจากการศึกษาบริบทของอุตสาหกรรมผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า ศักยภาพผู้ประกอบการและความต้องการของผู้บริโภคต่อการพัฒนาผู้ประกอบการ นำมาสู่การเชื่อมโยงข้อมูลไปยังการจัดทำมาตรฐานผู้ประกอบการโลจิสติกส์การเกษตรสู่เศรษฐกิจสีเขียว การจัดการสิ่งแวดล้อมและการบริหารธุรกิจเพื่อพัฒนาผู้ประกอบการให้ศักยภาพในการก้าวเข้าสู่เศรษฐกิจสีเขียว ผลการศึกษาและจัดทำมาตรฐานผู้ประกอบการโลจิสติกส์สีเขียว เป็นการนำเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบมาประยุกต์ใช้นั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบข้อกำหนดเบื้องต้นโดยใช้ Bartlett's test of sphericity และค่าสถิติ KMO (ตารางที่ 1) ซึ่งค่า KMO ที่คำนวณได้มีค่า 0.724 ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่า 0.5 และค่า Bartlett's test of sphericity มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ค่า p-value $\approx$ 0.00 นั่นคือตัวแปรทั้ง 18 ตัวแปรมีความสัมพันธ์กัน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมมีความเหมาะสมในการใช้เทคนิควิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบ

Table 1 KMO and Bartlett's test of sphericity

Kaiser – Meyer – Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO)		0.724
Bartlett's test of sphericity	Approx. Chi-Square	434.231
	df.	153
	Sig	0.000

จากนั้นทำการสกัดองค์ประกอบเพื่อพิจารณาว่าปัจจัยที่สามารถประยุกต์การจัดการโลจิสติกส์สีเขียวสู่แนวทางการสร้างมาตรฐาน แล้วทำการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยหมุนแกนแบบ Varimax ผลการวิเคราะห์ค่า Eigenvalues มีค่าระหว่าง 1.432-5.815 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 ดังตารางที่ 2

Table 2 Principal Component Analysis

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared			Rotation Sums of Squared		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	5.815	32.304	32.304	5.815	32.304	32.304	4.280	23.775	23.775
2	2.203	12.240	44.543	2.203	12.240	44.543	3.317	18.426	42.201
3	1.432	7.956	52.500	1.432	7.956	52.500	1.854	10.299	52.500
4	1.266	7.032	59.532						
5	1.197	6.649	66.181						
6	.942	5.233	71.415						
7	.818	4.545	75.960						
8	.790	4.388	80.348						
9	.618	3.434	83.782						
10	.583	3.240	87.023						
11	.561	3.114	90.137						
12	.438	2.431	92.568						
13	.381	2.114	94.682						
14	.275	1.528	96.211						
15	.205	1.141	97.352						
16	.191	1.063	98.414						
17	.168	.931	99.345						
18	.118	.655	100.000						

จากตารางที่ 2 แสดงสถิติการสกัดองค์ประกอบ โดยวิธี Principal Component จำนวน 18 องค์ประกอบ ค่าความแปรปรวนทั้งหมดในตัวแปรที่สามารถอธิบายได้ ปัจจัยที่ 1 มีความแปรปรวนมากที่สุดเท่ากับ 5.815 ความผันแปร 32.304% ปัจจัยที่ 2 มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 2.203 ความผันแปร 12.240% และปัจจัยที่ 3 มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1.432 ความผันแปร 7.956% ทำให้ทราบว่าปัจจัยทั้ง 3 อธิบายความแปรปรวนของตัวแปรทุกตัวได้ร้อยละ 52.500

การกำหนดค่าน้ำหนักปัจจัย (Factor Loading) ที่ได้จากการหมุนแกนแบบ Varimax ที่มีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์ระหว่างตัวแปรกับปัจจัยที่หมุนแกนแล้ว ดังตารางที่ 3 พบว่า

ปัจจัยที่ 1 เป็นการรวมตัวกันของตัวแปรจำนวน 6 ตัวแปร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ระหว่าง 0.612-0.827 คือ H1, H2, H3, H6, H9, H18 ตั้งชื่อปัจจัยที่ 1 นี้ว่า ปัจจัยด้านการจัดการองค์กรและวัตถุดิบ

ปัจจัยที่ 2 เป็นการรวมตัวกันของตัวแปรจำนวน 6 ตัวแปร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.543-0.825 คือ H7, H13, H14, H15, , H16, H17 ตั้งชื่อปัจจัยที่ 2 นี้ว่า ปัจจัยด้านอาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม

ปัจจัยที่ 3 เป็นการรวมตัวกันของตัวแปรจำนวน 2 ตัวแปร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.591-0.775 คือ H10, H11 ตั้งชื่อปัจจัยที่ 3 นี้ว่า ปัจจัยด้านพลังงานและระเบียบปฏิบัติ

Table 3 Rotation Component Matrix

Factor	Component		
	1	2	3
H1 : Product development plan	.827		
H2 : Material procurement plan	.799		
H3 : Green business ideas and policies	.719		
H6 : Recording of raw material for production	.640		
H7 : Non-Chemical dyed and decorate in prohibit list		.543	
H9 : Productivity improvement by clean technology	.612		
H10 : Cleaning process and organizing method			.775
H11 : Measures to support energy efficiency			.591
H13 : Record method and amount of natural dyes		.560	
H14 : Water usage per product recording		.761	
H15 : Water reusing		.825	
H16 : Quality control measuring equipment		.600	
H17 : Quality of waste water treatment		.606	
H18 : Natural dye case: Record the location and method of finding of plants	.619		

จากผลการวิจัยการจัดทำมาตรฐานเพื่อพัฒนา SMEs ทำให้ได้แนวทางและรูปแบบสำหรับ SMEs โลจิสติกส์สีเขียว เพื่อพัฒนาศักยภาพไปสู่ผู้ประกอบการกลุ่มที่ 1 ที่สามารถผลิตสินค้าตอบสนองความต้องการของตลาด ที่มีศักยภาพทางการส่งออก การตลาด และออกแบบ ได้ ดังแสดงเป็นแผนภาพอธิบายเกณฑ์มาตรฐานโลจิสติกส์สีเขียวสู่เศรษฐกิจสีเขียวสำหรับการพัฒนาผู้ประกอบการผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้าดังนี้

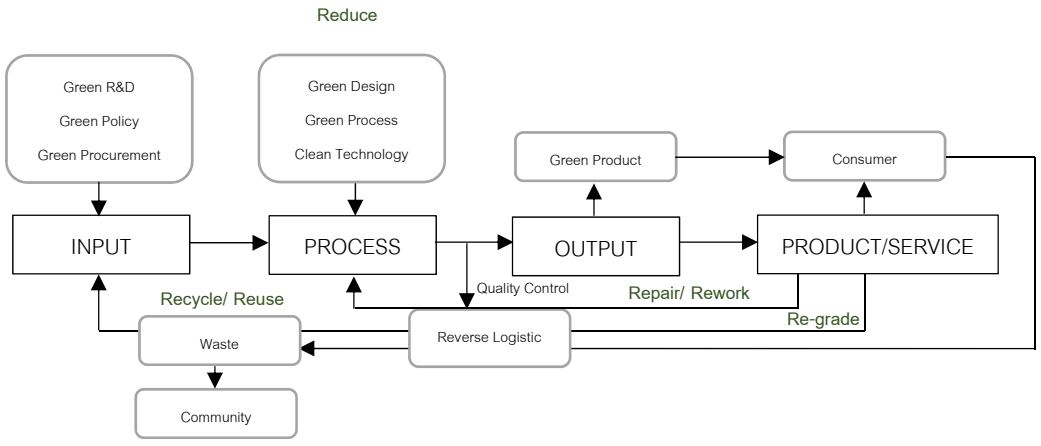


Figure 1 Green Logistic Information System for Supply Chain of agricultural Commodity

สรุป

การจัดทำมาตรฐานโลจิสติกส์เกษตรสีเขียวสู่การเป็นเศรษฐกิจสีเขียว ของผู้ประกอบการผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน 1 จะเป็นแนวทางให้วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมยึดมั่นในการประกอบกิจการให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน ด้วยการมุ่งเน้นในเรื่องการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตและการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง รวมถึงความรับผิดชอบต่อสังคมตลอดห่วงโซ่อุปทาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพาณิชย์จังหวัดเลยและศูนย์การศึกษาโลจิสติกส์และการค้าชายแดน ที่สนับสนุนทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2560 และขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ธันยมัย เจียรกุล. 2557. ปัญหาและแนวทางการปรับตัวของ OTOP เพื่อพร้อมรับการเปิด AEC. **วารสารนักบริหาร** 34: 191.

ปรีชา เปี่ยมพงษ์สานต์ และ ชัยณรงค์ เครือวน. 2558. เศรษฐกิจสีเขียวในชุมชนท้องถิ่นไทย : ศึกษาชุมชนท้องถิ่นแห่งหนึ่งในภาคตะวันออก. **วารสารเศรษฐศาสตร์การเมืองบูรพา**. ปีที่ 3 ฉบับที่ 2, 85-102.

Gurel, O., A.Z. Acar, I. Onden and I. Gumus. 2015. Determinants of the green supplier selection. **Procedia-Social and Behavioral Science**. 181. 131-139.

Hair, J.F., W.C. Black, B.J. Babin and R.E. Anderson. 2010. **Multivariate Data Analysis**. 7th ed. New Jersey: Prentice-Hall.

Lai, K.H. and C.W.Y. Wong. 2012. Green logistics management and performance: Some empirical evidence from Chinese manufacturing exporters. **Omega**, 40, 267-282.

Moreira, N., L. Antonio de Santa-Eulalia, D. Ait-Kadi, T. Wood-Harper and Y. Wang. 2015. A conceptual framework to develop green textile in the aeronautic completion industry: a case study in a large manufacturing company. **Journal of Cleaner Production**, 105, 371-388.

Perdana, Y.R. (2012). Logistics information system for supply chain of agricultural commodity. **Procedia-Social and Behavioral Science**, 65, 608-613.

Ramanathan, U., Bently, Y., and Pang, G. (2014). The role of collaboration in the UK green supply chains: an exploratory study of the perspectives of suppliers, logistics and retailers. **Journal of Cleaner Production**, 70, 231-241.

การศึกษาการไหลวนของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุที่หยุดนิ่งและเคลื่อนที่

An Investigation of Wake behind Stationary and Moving Objects

ภูริต กิ่งรุ้งเพชร์[1] และ ชวลิต กิตติชัยการ[1*]

Purit Kingrungpet[1] and Chawalit Kittichaikarn[1*]

บทคัดย่อ

คุณลักษณะของการไหลวนของของไหลแบบเคลื่อนที่ที่ไหลผ่านใบพัดในกังหันก๊าซ มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลเนื่องจากชั้นขอบผิวบนใบพัดจะถูกรบกวนด้วยการเหนี่ยวนำของการไหลวนนี้ซึ่งไปส่งผลกระทบด้านแรงเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนบนผิวใบพัด งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ได้ศึกษาคุณลักษณะของการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุที่อยู่กับที่ จุดประสงค์งานวิจัยนี้ คือ ศึกษาคุณลักษณะการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุที่อยู่กับที่และเคลื่อนที่ โดยเปรียบเทียบความแตกต่างในด้านการกระจายความเร็วและการกระจายระดับความปั่นป่วนภายในแต่ละการไหลวน การทดลองได้ทำในอุโมงค์ลมโดยในการจำลองการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุที่เคลื่อนที่จะใช้แท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่ตัดขวางการไหลซึ่งเปรียบเสมือนใบพัดโรเตอร์ต้นทาง เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อนได้นำมาใช้ในการเก็บข้อมูลความเร็วของการไหลวน จากผลการทดลองพบว่าระยะห่างด้านหลังของแท่งทรงกระบอกส่งผลต่อคุณลักษณะของการไหลวนอย่างมาก และอีกทั้งคุณลักษณะการไหลวนที่เกิดจากวัตถุทั้งแบบอยู่กับที่และเคลื่อนที่มีความใกล้เคียงกันมากในด้านความเร็วต่ำสุดและความปั่นป่วนสูงสุด ซึ่งอยู่ในระยะด้านหลัง (x/D) ที่ 10 ถึง 58.333

ABSTRACT

Characteristics of upstream moving wake passing a downstream blade in a gas turbine significantly affect periodic unsteady wake-induced transition in boundary layer over downstream blade. Recent researches have investigated only the characteristics of stationary wake behind objects such as turbine, propeller, wing, etc. The purpose of this paper is to experimentally investigate the characteristics of stationary and moving wakes on the velocity and turbulence intensity distributions within each single wake. The wake characteristics of both stationary and moving wakes are then compared. The moving wakes were generated by the transversely moving cylindrical bar representing an upstream rotor blade. The velocity of moving wakes was measured using hot-wire anemometer. The experiment was carried out in a low-speed wind tunnel with low turbulence. The results from the experiment show that downstream distances behind the bar greatly affect the wake characteristics. These characteristics of the stationary and the moving wakes are similar in velocity deficit and peak turbulence intensity in the range of downstream distance (x/D) at 10 to 58.333.

Key Words: Moving Wake, Wake Passing, Stationary Wake, Wake Characteristics

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ประสิทธิภาพและสมรรถนะของกังหันก๊าซ (Gas Turbine) ได้รับการพัฒนาทางด้านวิศวกรรมโดยมีความก้าวหน้าขึ้นเป็นลำดับในหลายๆทศวรรษที่ผ่านมา ในด้านกลศาสตร์ของไหล กลไกการไหลบนใบพัดของเครื่องอัด (Compressor blade) และใบพัดกังหัน (Turbine blade) เป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานของไหลกับพลังงานกล บริเวณหลังปลายใบพัดแต่ละใบจะมีการสร้างการไหลวน (Wake) ขึ้นมาและการไหลวนนี้จะเคลื่อนตัวผ่านใบพัดขั้นถัดไป ภายในลำธารการไหลวนจะมีพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy) (Hodson and Howell, 2005) โดยในแต่ละการไหลวนที่เกิดมาจากใบพัดโรเตอร์ (Rotor blade) จะมีลักษณะการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนออกไปจากกระแสการไหลหลักตามแนวแกนของความเร็วสัมพัทธ์ การเกิดการไหลวนนี้ เรียกว่า การไหลวนที่เกิดจากของไหลเคลื่อนที่ผ่านวัตถุที่เคลื่อนที่ (Moving wake) ซึ่งจะไหลไปกระแทกใบพัดสเตเตอร์ (Stator blade) การไหลวนบนผิวของใบพัดสเตเตอร์จะไปรบกวนชั้นขอบผิวและเหนี่ยวนำทำให้เกิดการไหลในช่วงการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิว (Wake-induced transition) โดยระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ภายในการไหลวนต้นทางที่มากระทบบนใบพัดขั้นถัดไปเป็นตัวการสำคัญอย่างมากในการควบคุมลักษณะการเปลี่ยนแปลงการไหลจากแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งเริ่มต้น, การเกิดจำนวนจุดปั่นป่วน และการกระจายตัวของจุดปั่นป่วน (Hodson and Howell, 2005; Kittichaikarn, 1999;Mayle, 1991) ข้อมูลระดับความปั่นป่วนของการไหลวนต้นทางเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดสมการแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงการไหล (Transition model) (Funazaki, 1994; Hodson *et al.*, 1992; Mayle and Dullenkopf, 1989; Piotrowski *et al.*, 2009) อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาคุณลักษณะของการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านใบพัดที่เคลื่อนที่ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้นทำได้ยากโดยเฉพาะการวัดความเร็วของของไหลด้วยเลเซอร์ดอปเพลอร์ (Laser Doppler velocimetry, LDV) หรือ เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (Hot-wire anemometer) (Zhang and Glezer, 1995) แม้ว่านักวิจัยหลายคนได้ศึกษาเรื่องคุณลักษณะของไหลวนแบบวัตถุเคลื่อนที่ แต่ก็ยังไม่มีงานวิจัยไหนที่ศึกษาการไหลวนที่ตำแหน่งต่างๆด้านหลังจากใบพัดต้นทางจนถึงก่อนใบพัดขั้นถัดไป

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการศึกษาการกระจายตัวของความเร็วและระดับความปั่นป่วนของการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุที่หยุดนิ่งและวัตถุที่เคลื่อนที่ใน 2 มิติในช่วงตำแหน่งด้านหลังใบพัดต้นทางจนถึงก่อนใบพัดขั้นถัดไป ด้วยการทดลองในอุโมงค์ลม โดยการศึกษาเปรียบเทียบในรูปของความเร็วต่ำสุด (Velocity deficit) และความปั่นป่วนสูงสุด (Peak turbulence intensity)

อุปกรณ์และวิธีการ

การติดตั้งการทดลองและระบบการวัด

การทดลองกระทำในอุโมงค์ลมความเร็วต่ำที่มีระดับความปั่นป่วนต่ำซึ่งแสดงใน Figure 1 โดยทำงานด้วยการดูดอากาศเข้าสู่อุโมงค์และสามารถทำความเร็วอากาศในช่วงการทดลองได้ในช่วง 2 ถึง 10 m/s และมีค่าระดับความปั่นป่วนอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.5% อุปกรณ์การทดลองและระบบการวัดสามารถแสดงได้ใน Figure 2

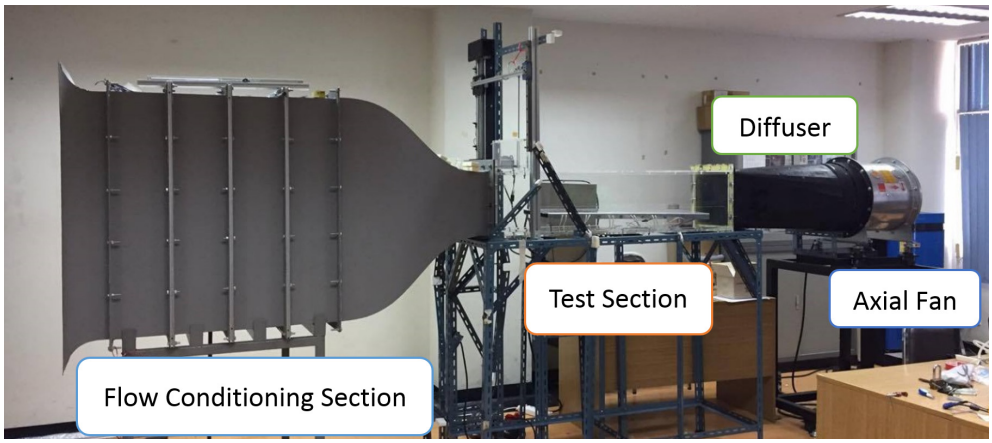


Figure 1 Low-speed wind tunnel

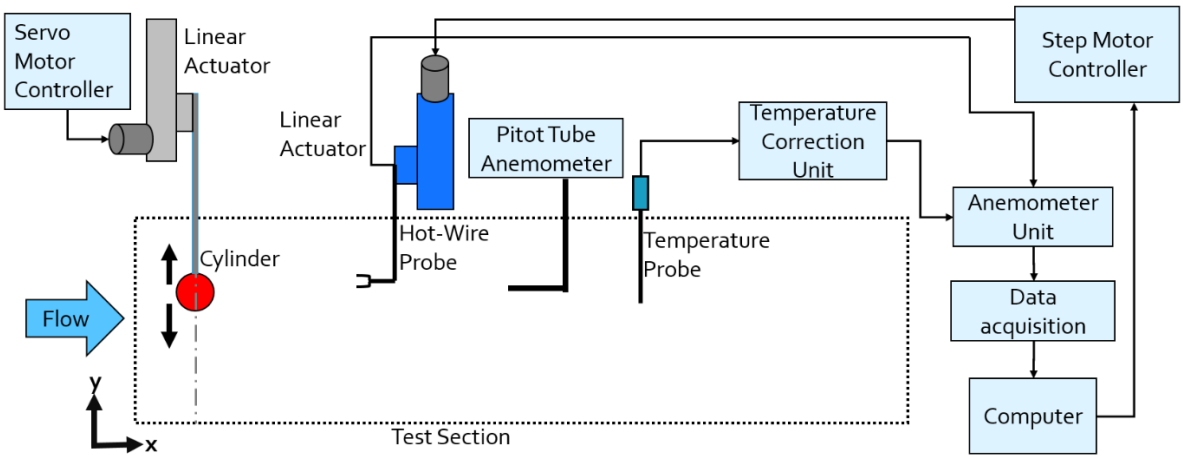


Figure 2 Test apparatus and measurement system

ในการสร้างการไหลวนของอากาศผ่านวัตถุเคลื่อนที่ ได้ใช้วัตถุแท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่ตัดขวางการไหลของอากาศในอุโมงค์ลมซึ่งการเคลื่อนที่ของแท่งทรงกระบอกนี้จะทำหน้าที่เสมือนเป็นใบพัดโรเตอร์ เพื่อสร้างการไหลวนต้นทางขึ้นมาใน 2 มิติ แท่งทรงกระบอกทำมาจากเหล็กและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 12 mm ชุดกลไกเคลื่อนที่เส้นตรงสำหรับแท่งทรงกระบอกมีหน้าที่ขับแท่งทรงกระบอกให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแกนเดียว โดยการเคลื่อนที่ของแท่งทรงกระบอกนี้จะวิ่งขวางและวิ่งตัดทั้งหน้าตัดส่วนการทดลอง รูปร่างและลักษณะการไหลวนของอากาศที่ไหลผ่านแท่งทรงกระบอกที่หยุดนิ่งอยู่กับที่และที่เคลื่อนที่แสดงดัง Figure 3

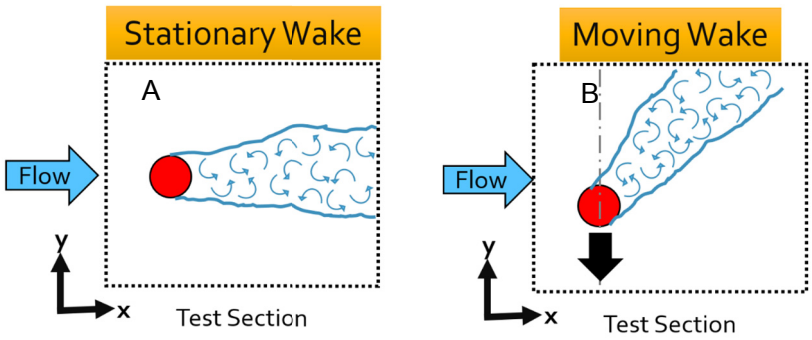


Figure 3 Stationary (A) and moving (B) wakes

ในการวัดความเร็วของอากาศจะใช้เครื่องมือวัดความเร็วแบบลวดร้อนและระบบการวัดข้อมูลความเร็ว ประกอบไปด้วย หัววัดลวดร้อน(Hot-wire probe) รุ่น Dantec 55P11, หัววัดอุณหภูมิ (Temperature probe) รุ่น Dantec 90P10 และ ตัวเก็บข้อมูล (Data acquisition) รุ่น NI USB-6212

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ความเร็วของการไหลผ่านแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm มีค่าเลขเรย์โนลด์ (Re_D) เท่ากับ 3000 ซึ่งอยู่ในช่วงที่งานวิจัยที่ได้จำลองการทดลองของไหลวนสำหรับการไหลวนของใบพัดโรเตอร์ (Liang *et al.*, 2015) โดยอัตราส่วนความเร็ว (ϕ) การเคลื่อนที่แท่งทรงกระบอกเทียบกับความเร็วการไหล ตำแหน่งแนวตั้งหรือตำแหน่งขวางแนวการไหล (y/D) ถูกกำหนดตำแหน่งอ้างอิงศูนย์อยู่ที่กึ่งกลางของหน้าตัดท่อส่วนการทดลอง และในส่วนระยะตามแนวกระแสการไหลหลัก (x/D) ถูกกำหนดตำแหน่งอ้างอิงศูนย์จากแท่งทรงกระบอก

การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านแท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่ ข้อมูลสัญญาณความเร็วที่ได้จากการวัดด้วยลวดร้อนจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิควมเฉลี่ยข้อมูล เพื่อผลการทดลองที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ (Kittichaikarn, 1999) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\tilde{u}(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} u_i(t) \tag{1}$$

โดย N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด, t คือเวลาใดๆ, u_i คือความเร็ว ณ เวลาต่างๆ

ความเร็วผันผวน ณ เวลาใดๆ คำนวณด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองรวม (Ensemble root mean square) ดังสมการที่ 2

$$\tilde{u}'(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}[u_i(t) - \tilde{u}(t)]^2} \tag{2}$$

ดังนั้นค่าระดับความปั่นป่วน ณ เวลาใดๆ คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$Tu(t) = \frac{\tilde{u}'(t)}{\tilde{u}(t)} \quad (3)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การกระจายตัวรูปแบบความเร็วและค่าระดับความปั่นป่วนของการไหลวนแบบเคลื่อนที่

Figure 4 แสดงค่าความเร็วและค่าระดับความปั่นป่วนของการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุเคลื่อนที่เทียบกับเวลาในหน่วยวินาที อัตราส่วนความเร็วการเคลื่อนที่แท่งทรงกระบอกเทียบกับความเร็วกระแสการไหลหลัก (ϕ) เท่ากับ 0.27 แท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่ลง และตำแหน่งวัด x/D เท่ากับ 4.167และ y/D เท่ากับ 0 จากผลการทดลองพบว่ามีการกระจายตัวความเร็วและความเร็วต่ำสุด เนื่องจากการแยกไหลของการไหลผ่านแท่งทรงกระบอกหรือใบพัดเป็นสาเหตุหลักที่สร้างการไหลวนขึ้นมาที่ด้านหลังวัตถุ ด้วยเหตุผลนี้ความเร็วในแนวกระแสการไหลหลักมีความผันผวนด้วยกระแสหมุนวน (Vortices) ภายในลำธารการไหลวน ทำให้เกิดการกระจายตัวรูปแบบค่าระดับความปั่นป่วนภายในการไหลวนดังแสดงใน Figure 4 ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่ารูปแบบความเร็วแสดงการเกิดความเร่งเล็กน้อยเหนือค่ากระแสการไหลหลักบริเวณวงกลมสีแดงก่อนจะลดลงจนถึงความเร็วต่ำสุดซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับ Funazaki (1994), Kittichaikarn (1999) และ Takeuchi *et al.* (2012) แต่ในทางกลับกัน รูปแบบค่าระดับความปั่นป่วนไม่มีผลกระทบมาจากความเร่งนี้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเร่งความเร็วนี้เป็นของกระแสการไหลหลักและไม่ได้อยู่ภายในลำธารการไหลวน

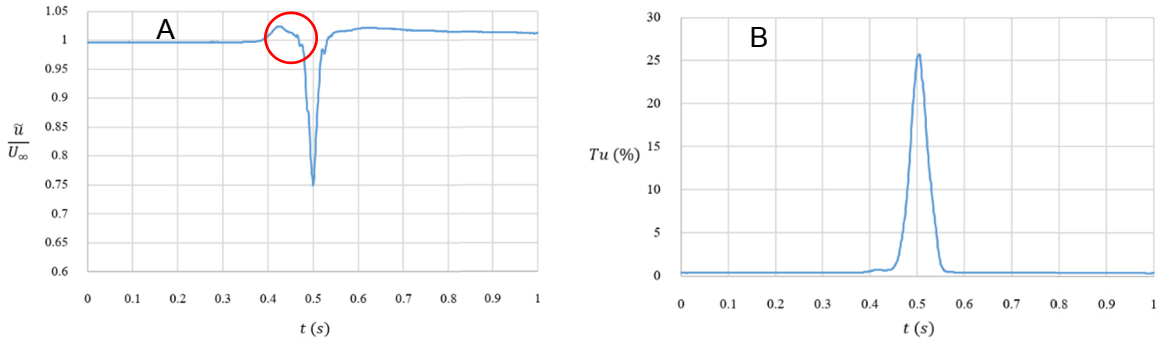


Figure 4 Characteristics of moving wake velocity (A) and turbulence intensity (B)

ผลกระทบจากระยะห่างด้านหลังของแท่งทรงกระบอก

ตำแหน่งที่วัดห่างจากด้านหลังแท่งทรงกระบอกสำหรับการไหลวนแบบเคลื่อนที่มีทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ผลการทดลองดังแสดงใน Figure 5 โดยแสดงในรูปของตัวแปรมิติไร้หน่วยของเวลาด้วยคาบเวลา (T) ของแท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดการทดลอง จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นความเร็วต่ำสุด (Velocity deficit) ที่มีค่ามากที่สุดซึ่งเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ x/D เท่ากับ 10 และยังแสดงให้เห็นค่าระดับความปั่นป่วนสูงสุด (Peak turbulence intensity) ที่มีค่ามากที่สุดที่ x/D เท่ากับ 10 เช่นกัน และยังลดลงไปเรื่อยๆตามระยะห่างไกลขึ้น

ระยะเวลาการไหลวนก็กว้างขึ้นด้วยเช่นกัน หากระยะห่างไกลขึ้นอีกไปเรื่อยๆ ความเร็วต่ำสุดจะลดลงและรูปแบบความเร็วกว้างขึ้นไปตามระยะห่างจนกระทั่งการไหลวนจะสลายไปกลายเป็นกระแสการไหลหลัก ดังนั้นจากผลการทดลองจะพบว่าพฤติกรรมของรูปแบบค่าระดับความปั่นป่วนมีค่าใกล้เคียงกันมากกับพฤติกรรมของรูปแบบความเร็ว

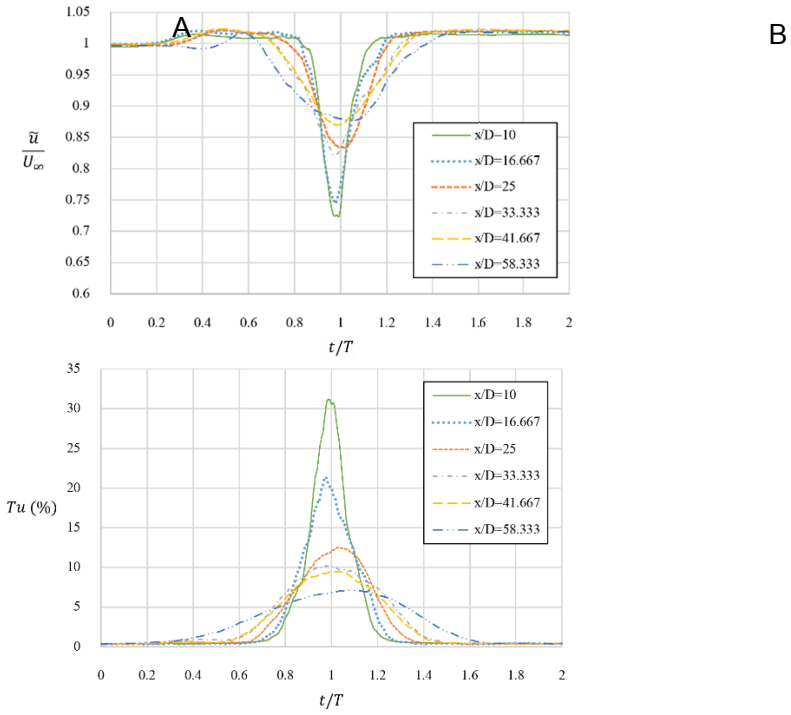


Figure 5 Moving wake velocity (A) and turbulence intensity (B) at various downstream distances

สำหรับการไหลวนที่เกิดจากของไหลไหลผ่านแท่งทรงกระบอกที่หยุดนิ่งอยู่กับที่ จากผลการทดลองดังแสดงใน Figure 6 พบว่ารูปแบบการกระจายตัวทั้งความเร็วและความปั่นป่วนภายในการไหลวนมีคุณลักษณะการไหลวนที่คล้ายคลึงกับแบบที่แท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่ อีกทั้งยังมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะการไหลวนนี้คล้ายกันเมื่อระยะห่างด้านหลังแท่งทรงกระบอกไกลขึ้น

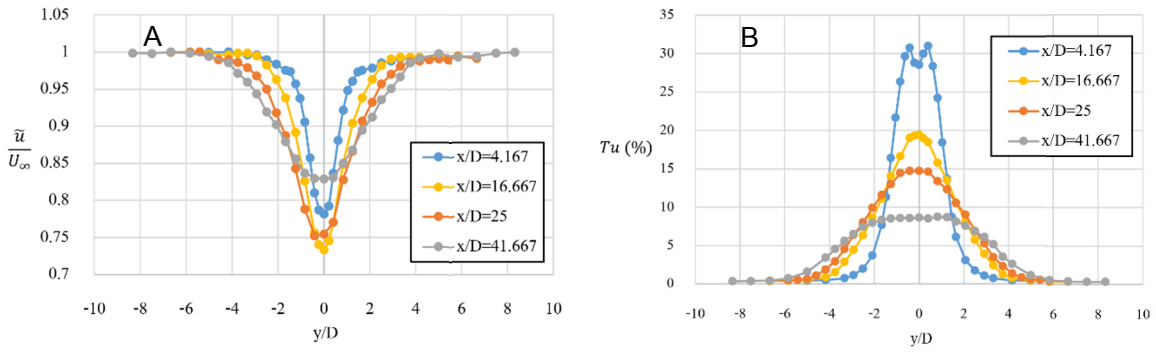


Figure 6 Stationary wake velocity (A) and turbulence intensity (B) at various downstream distances

การเปรียบเทียบคุณลักษณะการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านแท่งทรงกระบอกที่อยู่กับที่และเคลื่อนที่

ผลการทดลองความเร็วต่ำสุด (Velocity deficit, U_C) และค่าความปั่นป่วนสูงสุด (Peak turbulence intensity, Tu_C) ของการไหลวนทั้งสองแบบ ณ ตำแหน่งต่างๆด้านหลังของแท่งทรงกระบอก (Figure 7) ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันโดยกำหนดความเร็วกระแสการไหลหลักและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอกเท่ากัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วต่ำสุดของการไหลวนทั้งสองแบบมีความใกล้เคียงกันในทุกกรณีของความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งทรงกระบอก ส่วนค่าความปั่นป่วนสูงสุดทั้งสองแบบมีความใกล้เคียงกันทุกกรณีเช่นกัน เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่กลไกการไหลของการไหลวนเหมือนกันทั้งสองแบบ สิ่งที่แตกต่างกันนั้นคือการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านแท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่จะไหลไปตามกระแสการไหลหลักโดยมีความเร็วลดลงและความปั่นป่วนสูงขึ้นตามช่วงเวลาที่การไหลวนไหลผ่าน และหากการไหลวนนี้ไปกระทบกับผิวของแผ่นระนาบหรือผิวของใบพัดในขั้นถัดไป จะทำให้ช่วงระยะเวลาที่การไหลบนพื้นผิวเป็นแบบปั่นป่วนจะนานกว่า เนื่องจากการไหลวนมีการทำมุมเอียงกับพื้นผิวตามแนวของความเร็วสัมพัทธ์ ในส่วนของการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุหยุดนิ่งอยู่กับที่จะมีความเร็วลดลงคงที่และความปั่นป่วนคงที่ ณ จุดนั้นๆ ภายในขอบเขตของการไหลวน

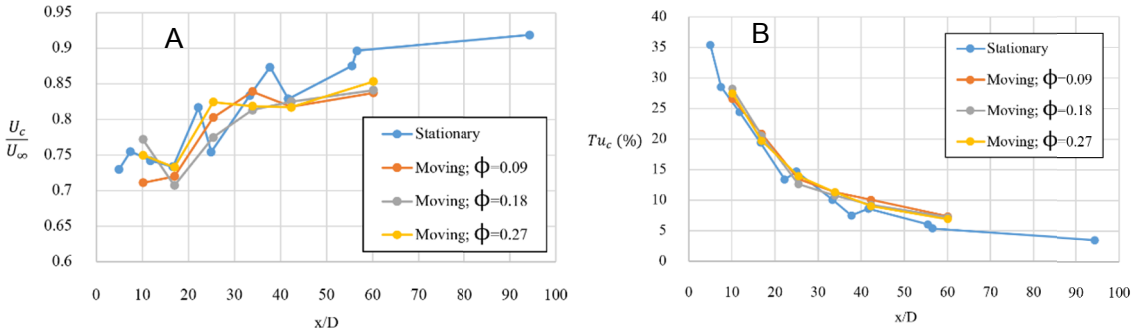


Figure 7 Comparison wake velocity deficit (A) and peak turbulence intensity (B) between stationary and moving at various downstream distances

สรุป

จากผลการศึกษาที่ได้จากการทดลองทั้งหมดของการไหลวนต้นทางแบบเคลื่อนที่ 2 มิติ ที่เสมือนเป็นใบพัดโรเตอร์ในกังหันก๊าซ โดยแสดงข้อมูลในลักษณะการกระจายตัวรูปแบบของความเร็วและระดับความปั่นป่วน สรุปได้ว่า ระยะห่างด้านหลังแท่งทรงกระบอกส่งผลชัดเจนต่อคุณลักษณะนี้ โดยยิ่งห่างไกลมากขึ้นความรุนแรงของคุณลักษณะนี้จะลดลงและค่อยๆสลายตัวเข้าสู่สภาวะกระแสการไหลหลัก

ผลจากการเปรียบเทียบคุณลักษณะการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุแท่งทรงกระบอกที่อยู่กับที่และเคลื่อนที่ สรุปได้ว่า มีความใกล้เคียงกันมาก ไม่ว่าจะเป็นที่ความเร็วใดๆในการเคลื่อนของแท่งทรงกระบอก นั่นแสดงว่า สมการความสัมพันธ์ต่างๆที่ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการไหลวนผ่านแท่งทรงกระบอกหยุดนิ่งอยู่กับที่สามารถนำมาใช้ทำนายผลของการไหลวนที่เกิดจากการไหลผ่านแท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่ได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการไหลวนที่เกิดจากอากาศไหลผ่านใบพัดโรเตอร์ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซได้ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนผู้ช่วยนักวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ให้การสนับสนุนกับงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

Funazaki, K. 1994. Unsteady Boundary Layers on a Flat Plate Disturbed by Periodic Wakes: Part I — Measurement of Wake-Affected Heat Transfer and Wake-Induced Transition Model, pp. 327-336. *In* **Proceddings of the International Gas Tubine and Aeroengine Congress and Exposition**. 13-16 June 1994, The American Society of Mechanical Engineers. The Hague, Netherlands.

Hodson, H.P. and R.J. Howell. 2005. The Role of Transition in High-Lift Low-Pressure Turbines for Aeroengines. **Progress in Aerospace Sciences**. 41(6): 419-454.

Hodson, H.P., J.S. Addison and C.A. Shepherson. 1992. Models for Unsteady Wake-Induced Transition in Axial Turbomachines. **J. Phys. III France**. 2(4): 545-574.

Kittichaikarn, C. 1999. **A Study of Turbulent Spots and Wake Induced Transition Using Liquid Crystals**. Ph.D Thesis, University of Oxford.

Liang, Y., Z.-P. Zou, H.-X. Liu and W.-H. Zhang. 2015. Experimental Investigation on the Effects of Wake Passing Frequency on Boundary Layer Transition in High-Lift Low-Pressure Turbines. **Experiments in Fluids**. 56(4): 81.

Mayle, R.E. 1991. The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines, pp. 509-537. *In* **Proceddings of the International Gas Tubine and Aeroengine Congress and Exposition**. 3-6 June 1991, The American Society of Mechanical Engineers. Orlando, Florida, United States of America.

Mayle, R.E. and K. Dullenkopf. 1989. A Theory for Wake-Induced Transition, pp. 188-195. *In* **Proceddings of the International Gas Tubine and Aeroengine Congress and Exposition**. 4-8 June 1989, The American Society of Mechanical Engineers. Toronto, Ontario, Canada.

Piotrowski, W., W. Elsner and S. Drobniak. 2009. Transition Prediction on Turbine Blade Profile with Intermittency Transport Equation. **Journal of Turbomachinery**. 132(1): 10-20.

Takeuchi, K., S. Fujimoto, E. Koyabu and T. Tsukiji. 2012. Experimental Studies on Wake-Induced Transition of Turbulent Boundary Layers, pp. 1197-1203. *In* **Proceddings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. 9-15 November 2012, The American Society of Mechanical Engineers. Houston, Texas, United States of America.

Zhang, L.J. and B. Glezer. 1995. Indirect Turbulence Measurement in Gas Turbine Stages Using Heat Flux Probe, pp. 4-9. *In* **Proceddings of the International Gas Tubine and Aeroengine Congress and Exposition.** 5-8 June 1995, The American Society of Mechanical Engineers. Houston, Texas, United States of America.

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์สู่รถไฟฟ้าและระยะทางเข้าถึงสถานี: กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีแดง สถานีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Relationship between Modal Shift Decisions from Road to Rail and Station Access Distances: A Case Study of Red Line Commuter Line Kasetsart University Station

คุณาธิป หวานเสร็จ[1*] เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล[1] และ วิโรจน์ รุโจปการ[1]

Kunatip Warnset[1*], Ackchai Sirikijpanichkul[1] and Wiroj Rujopakarn[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลไปสู่รถไฟฟ้าสายสีแดงของผู้ที่เดินทางมายังมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จากผลการวิจัยพบว่าปัจจัยด้านระยะทางในการเดินทางและรูปแบบการเดินทางเข้าสู่สถานีส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถไฟฟ้าสายสีแดง โดยเมื่อระยะห่างระหว่างที่พักกับมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เพิ่มขึ้น10กิโลเมตร จะส่งผลให้ผู้เดินทางเปลี่ยนรูปแบบมาใช้รถไฟฟ้าสายสีแดงมากขึ้นถึงร้อยละ 58.6 สำหรับการเชื่อมต่อโดยการเดิน ร้อยละ 39.2 สำหรับการเชื่อมต่อโดยรถจักรยานยนต์ และร้อยละ 32.9 สำหรับการเชื่อมต่อโดยระบบขนส่งสาธารณะ

ABSTRACT

This research is aimed at studying the relationship between modal shift decisions from road to rail and station access distances for commuting trips to Kasetsart University. The samples are clustered by travel distance and first-mile access modes. The result shows that both factors have influences on modal shift decisions from road to rail with a proportion of 58.6%, 39.2% and 32.9% for first-mile walk, motorcycle, and public-transport access, respectively.

Key Words :Red Line, Utility Theory, Modal Shift, First-mile Access

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

เศรษฐกิจของประเทศไทยมีการพัฒนาและเติบโตอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน ทั้งในด้านการส่งออก การคมนาคม และการศึกษาโดยมีศูนย์กลางความเจริญอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเป็นหลัก จึงก่อให้เกิดปัญหาด้านการจราจรที่ติดขัด อันเนื่องมาจากปริมาณการเดินทางของประชากรไปทำงาน ไปเรียนหนังสือ ไปห้างสรรพสินค้า และเดินทางกลับที่พักอาศัยในแต่ละวันสูงเกินกว่าขีดความสามารถในการรองรับของระบบถนน ระบบการขนส่งทางเลือกเช่นระบบรางจึงเข้ามามีบทบาทที่สำคัญในการบรรเทาสภาพจราจรบนถนนและเพิ่มประสิทธิภาพในการเดินทางให้กับประชาชน

โครงการระบบขนส่งทางรถไฟยกระดับในเขตกรุงเทพมหานครหรือโครงการระบบรถไฟชานเมือง สายสีแดงได้รับการเร่งรัดให้ดำเนินการในสายเหนือ ช่วงบางซื่อ -รังสิตก่อน รวมทั้งพัฒนาสถานีรถไฟบางซื่อเป็นสถานีหลัก เพื่อลดจำนวนขบวนรถไฟเข้าสู่สถานีหัวลำโพงลงให้เหลือน้อยที่สุด ต่อมาได้มีการปรับขอบเขตโครงการให้เพิ่มปริมาณความจุของทางและการเดินรถที่ความเร็วสูงขึ้น ให้เกิดความสะดวกและปลอดภัย รวมทั้งพัฒนาสถานีบางซื่อให้เป็นสถานีกลางโดยมีเป้าหมายพัฒนาให้ย่านพหลโยธินเป็นศูนย์กลางคมนาคมขนส่งของกรุงเทพมหานครด้านเหนือ เพื่อให้สอดคล้องกับแผนแม่บทการขนส่งมวลชนระบบรางในเขตกรุงเทพฯ และพื้นที่ต่อเนื่องเพื่อเป็นการสานต่อโครงการระบบการขนส่งทางรางตามนโยบายของรัฐบาล ให้สามารถอำนวยความสะดวกแก่ประชาชนที่ใช้บริการในระบบรถไฟทางไกลรถไฟชานเมือง อีกทั้งขยายขีดความสามารถในการเดินรถขนส่งผู้โดยสารและขนส่งสินค้าในโครงข่ายเดียวกัน เพื่อเชื่อมโยงการเดินทางของระบบรถไฟและโครงข่ายระบบขนส่งอื่นๆอันเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งสาธารณะให้ดีขึ้น เพื่อจูงใจให้ประชาชนมาใช้บริการ และประหยัดค่าเชื้อเพลิงการขนส่ง นับเป็นแนวทางแก้ปัญหาการขนส่งและจราจรอย่างยั่งยืน

การดำเนินงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลผลกระทบต่อการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางของบุคลากรและนิสิตมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จากรถยนต์ส่วนบุคคลไปสู่รถไฟฟ้า โดยนำสถานีโดยรอบมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ของระบบรถไฟฟ้าสายสีแดงมาใช้เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีปริมาณการเดินทางสูง และประสบปัญหาการจราจรติดขัด

อุปกรณ์และวิธีการ

ทฤษฎีอรรถประโยชน์

ความพึงพอใจสามารถวัดค่าได้ด้วยฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์ (Utility Function) และจะมีค่าความไม่แน่นอนรวมอยู่ด้วยเราเรียกว่า ฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์เชิงสุ่ม (Random Utility Function) ซึ่งความผิดพลาดของข้อมูลอาจเกิดได้จาก การตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางบางส่วนมีความไม่เหมาะสม และขาดความครบถ้วนของข้อมูล

ดังนั้นฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์ (Random Utility Function) ประกอบไปด้วยส่วนของอรรถประโยชน์ที่วัดค่าได้แน่นอน (Systematic Components) และ ส่วนที่รวบรวมความไม่แน่นอนที่ไม่สามารถวัดค่าได้ (Random Component) ซึ่ง (Ben-Akiva and Lerman (1985))ได้กำหนดสมการอรรถประโยชน์ไว้ ดังสมการ

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in}$$

โดยที่ U_{in} คือ ค่าความพึงพอใจที่ผู้เดินทางคนที่ n ได้รับจากการเดินทางด้วยรูปแบบที่ i

V_{in} คือ ส่วนประกอบของตัวแปรอิสระ (Systematic Components) ที่วัดได้ของผู้เดินทางคนที่ n ที่ได้รับจากการเดินทางด้วยรูปแบบที่ i

ε_{in} คือ ส่วนของความพอใจแบบสุ่ม (Random Components) ของผู้เดินทาง คนที่ n ที่ได้รับจากการเดินทางด้วยรูปแบบที่ i

ในการพัฒนาแบบจำลองโลจิตมีความจำเป็นต้องทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันอรรถประโยชน์ซึ่งมีวิธีการประมาณค่าอยู่หลายวิธีแต่ผู้เชี่ยวชาญหลายท่านได้แนะนำให้ใช้วิธีการทางสถิติที่เรียกว่า Maximum Likelihood หรือ ML เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกการวิเคราะห์สามารถทำได้ง่ายและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด (Ben–Akiva & Lerman, 1985)

การสร้างแบบสอบถาม

ในการทำการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ใช้แบบสอบถามประเภท Stated Preference Survey ซึ่ง Ortuzar JD. And Willumsen LG.1994.กล่าวว่าการทำSP-surveyจำนวนตัวอย่าง50-100ก็เพียงพอแล้ว คือได้มีการสร้างสถานการณ์สมมติในการเปลี่ยนแปลงเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางเพื่อศึกษาว่าปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละสถานการณ์ส่งผลกระทบต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้ตอบแบบสอบถามอย่างไร โดยแบบสอบถามประกอบไปด้วยกลุ่มคำถาม 3 ส่วน ได้แก่

1.ส่วนข้อมูลคุณลักษณะทั่วไปของผู้เดินทาง ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย เพศ อายุ อาชีพ รายได้ การศึกษา ใบอนุญาตขับขี่ และการครอบครองยานพาหนะ ข้อมูลในส่วนนี้ใช้เพื่อคัดกรองกลุ่มตัวอย่างว่ากลุ่มตัวอย่างเป็นไปตามจุดประสงค์ของการศึกษาหรือไม่

2.ส่วนข้อมูลลักษณะการเดินทางในปัจจุบันของผู้เดินทาง ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย วัตถุประสงค์ในการเดินทาง ตำแหน่งที่พักอาศัย ความถี่ในการเดินทาง ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง เวลาในการเดินทาง ระยะทางจากที่พักอาศัย ข้อมูลในส่วนนี้ใช้เพื่อเลือกรูปแบบชุดทำถาม SP survey ว่าผู้ทำแบบสอบถามจะต้องตอบแบบสอบถามชุดใด

3.ส่วนการเลือกสถานการณ์ Stated Preference Survey ในส่วนนี้จำนวนชุดแบบสอบถามจะมีทั้งหมด 9 ชุด โดยแต่ละชุดจะจำแนกตามระยะห่างระหว่างบ้านถึงสถานีรถไฟฟ้าสายสีแดงโดยแบ่งเป็น 3 ระยะการเข้าถึง โดยระยะที่ 1 ระยะทางจากที่พักถึงสถานีจะอยู่ที่ 0-1 กิโลเมตร โดยจะสมมติให้ผู้เดินทางเข้าถึงสถานีด้วยการเดิน ระยะที่ 2 ระยะทางจากที่พักถึงสถานีจะอยู่ที่ 1–5 กิโลเมตร โดยจะสมมติให้ผู้เดินทางเข้าถึงสถานีด้วยรถจักรยานยนต์รับจ้าง ระยะที่ 3 ระยะห่างจากที่พักถึงสถานีจะอยู่ที่ 5-15 กิโลเมตร โดยจะสมมติให้ผู้เดินทางเข้าถึงสถานีด้วยระบบขนส่งสาธารณะ และจำแนกระยะการเดินทางด้วยรถไฟฟ้าออกเป็นอีก 3 ระยะ ได้แก่ ภายใน 5, 5-10,และ 10-15 กิโลเมตร ซึ่งในแต่ละชุดจะแบ่งออกเป็น 9 สถานการณ์ ในแต่ละสถานการณ์ให้ผู้ตอบแบบสอบถามเปรียบเทียบเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางแต่ละทางเลือกและตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางที่คิดว่าเหมาะสมที่สุด ยกตัวอย่างในสถานการณ์สมมุติชุดที่ 6 ที่มีระยะห่างระหว่างที่พักถึงสถานีระหว่าง 5-15 กิโลเมตร และ ระยะทางการเดินทางด้วยรถไฟฟ้า 10-15 กิโลเมตร โดยกำหนดสถานการณ์ตั้งต้นให้เดินทางด้วยรถยนต์ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายการเดินทางอยู่ที่ 43 บาท และระยะเวลาในการเดินทาง 80 นาที จากนั้นสร้างสถานการณ์สมมุติให้ค่าใช้จ่ายและเวลาในการเดินทางเปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้ผู้เดินทางเลือกตอบว่าจะเปลี่ยนแปลงมาใช้รถไฟฟ้าหรือไม่ โดย 9 สถานการณ์สมมุติในกรณีชุดที่ 6 มีดังนี้

3.1 หากค่าใช้จ่ายลดลง 15 บาท ระยะเวลาที่ใช้เดินทาง ลดลง 36 นาที

3.2 หากค่าใช้จ่ายลดลง 15 บาท ระยะเวลาที่ใช้เดินทาง ลดลง 14 นาที

3.3 หากค่าใช้จ่ายลดลง 15 บาท ระยะเวลาที่ใช้เดินทาง เพิ่มขึ้น 12 นาที

3.4 หากค่าใช้จ่ายลดลง 9 บาท ระยะเวลาที่ใช้เดินทาง ลดลง 36 นาที

3.5 หากค่าใช้จ่ายลดลง 9 บาท ระยะเวลาที่ใช้เดินทาง ลดลง 14 นาที

3.6 หากค่าใช้จ่ายลดลง 9 บาท ระยะเวลาที่ใช้เดินทาง เพิ่มขึ้น 12 นาที

3.7 หากค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น 5 บาท ระยะเวลาที่ใช้เดินทาง ลดลง 36 นาที

3.8 หากค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น 5 บาท ระยะเวลาที่ใช้เดินทาง ลดลง 14 นาที

3.9 หากค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น 5 บาท ระยะเวลาที่ใช้เดินทาง เพิ่มขึ้น 12 นาที

การสร้างแบบสอบถาม

ในการเก็บข้อมูลผู้ทำการศึกษาต้องการสุ่มกลุ่มตัวอย่างบุคคลที่ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลในการเดินทางเป็นประจำเพื่อเข้ามาประกอบกิจกรรมภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ใช้เวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูล 36 วัน ได้จำนวนกลุ่มตัวอย่าง 373 ชุด

ผลการวิจัย

ข้อมูลเบื้องต้นของกลุ่มตัวอย่าง

การวิเคราะห์ข้อมูลแบบสอบถามส่วนที่ 1 พบว่าลักษณะทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามสามารถจำแนกออกได้ เป็นดังนี้

Table 1 General characteristics of the respondents.

		Frequency	Percent
Gender	Male	151	40.5
	Female	222	59.5
Age (Years)	Under 20	6	1.6
	20-30	130	34.9
	30-40	111	29.8
	40-50	89	23.9
	Over 50	37	9.9
Income (Baht per Month)	Under 15,000	86	23.1
	15,000-25,000	178	47.7
	25,000-35,000	57	15.3
	35,000-45,000	32	8.6
	45,000-60,000	13	3.5
	Over 60,000	7	1.9

Occupation	Public Servants	33	8.8
	Public Officers	147	39.4
	Officers	123	33
	Students	54	14.5
	Others	16	4.3
Education	Undergraduate	57	15.3
	Bachelor	222	59.5
	Master	82	22
	Doctoral	12	3.2

ผลการวิเคราะห์

จากข้อมูลทั้งหมด 373 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 9 สถานการณ์ทำให้มีข้อมูลในการวิเคราะห์ทั้งหมด 3,357 ข้อมูล ในการวิเคราะห์ข้อมูลในลักษณะ Binary Logit Model ด้วยการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood (ML) โดยจำแนกข้อมูลด้วยระยะห่างระหว่างที่พักถึงสถานี ได้สมการอรรถประโยชน์ 3 ชุดสมการ ดังนี้

แบบจำลองชุดที่ 1 เป็นแบบจำลองที่ผู้เดินทางมีที่พักอยู่ห่างจากสถานี 0-1 กิโลเมตรและเข้าถึงสถานีโดยการเดิน ได้ค่าρ^2=0.2911,Log likelihood function =-588.1988,Chi-squared=380.9459และสมการอรรถประโยชน์ดังนี้

$$U_{Car1} = -0.1055*TravelTime -0.1494*TravelCost + 1.0945$$

$$U_{Walk + SRT\ Red} = -0.1055*TravelTime -0.1494*TravelCost$$

แบบจำลองชุดที่ 2 เป็นแบบจำลองที่ผู้เดินทางมีที่พักอยู่ห่างจากสถานี 1-5 กิโลเมตรและเข้าถึงสถานีโดยรถจักรยานยนต์รับจ้าง ได้ค่าρ^2=0.2747,Log likelihood function =-552.003,Chi-squared=325.9027 และสมการอรรถประโยชน์ดังนี้

$$U_{Car2} = -0.0686*TravelTime -0.0781*TravelCost + 0.9929$$

$$U_{MC + SRT\ Red} = -0.0686*TravelTime -0.0781*TravelCost$$

แบบจำลองชุดที่ 3 เป็นแบบจำลองที่ผู้เดินทางมีที่พักอยู่ห่างจากสถานี 5-15 กิโลเมตรและเข้าถึงสถานีโดยระบบขนส่งสาธารณะ ได้ค่าρ^2=0.2448,Log likelihood function =-555.8903,Chi-squared=349.8664 และสมการอรรถประโยชน์ดังนี้

$$U_{Car3} = -0.0560*TravelTime -0.0749*TravelCost + 1.5672$$

$$U_{Bus + SRT\ Red} = -0.0560*TravelTime -0.0749*TravelCost$$

ยกตัวอย่างการแทนค่าในแบบจำลองชุดที่ 3 สถานการณ์สมมุติที่ 6 โดยการแทนค่าใส่ในสมการโดย กำหนดค่า Travel Time = 80 นาที Travel cost = 42.6 บาท สำหรับรถยนต์ และ Travel Time = 66 นาที Travel cost = 34 บาท สำหรับรถไฟฟ้า จากการแทนค่า จะได้ U_{Car3} = -6.1070 และ $U_{Bus + SRT\ Red}$ = -6.2454 จากนั้นจะได้ค่า probability = 0.5345 สำหรับรถยนต์ และ 0.4655 สำหรับรถไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่าจากปัจจุบันสมมุติให้ผู้ใช้

รถยนต์เป็น 100% แต่หากมีรถไฟฟ้าสายสีแดงเกิดขึ้นจะทำให้มีโอกาสที่ผู้เดินทางจะเปลี่ยนมาใช้รถไฟฟ้า 46.55%

จากแทนค่าในแต่ละแบบจำลอง จะทำให้ทราบถึงสัดส่วนการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลไปสู่รถไฟฟ้าสายสีแดงดังตาราง

Table 2 The proportion of the modal shift from private vehicles to red commuter line clustered by distance traveled and the first-mile access distance to the station.

Travel distance	0-5 kilometers	5-10 kilometers	10-15 kilometers
Model 1	20.1	52.3	78.7
Model 2	26.8	44.8	66
Model 3	31.3	46.5	64.2

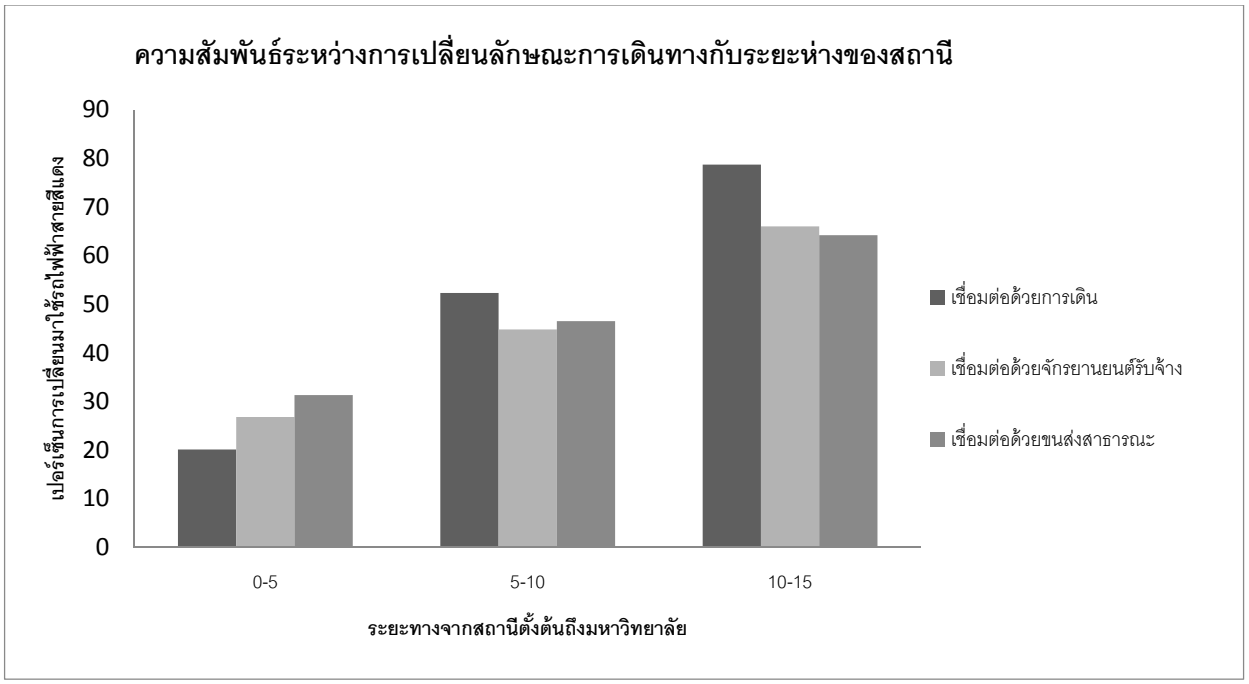


Figure 1 The relationship between the proportion of modal shift from private vehicles to red commuter line and the distance from the originating station to the university clustered by first-mile access modes indicated by distance between station and Kasetsart University.

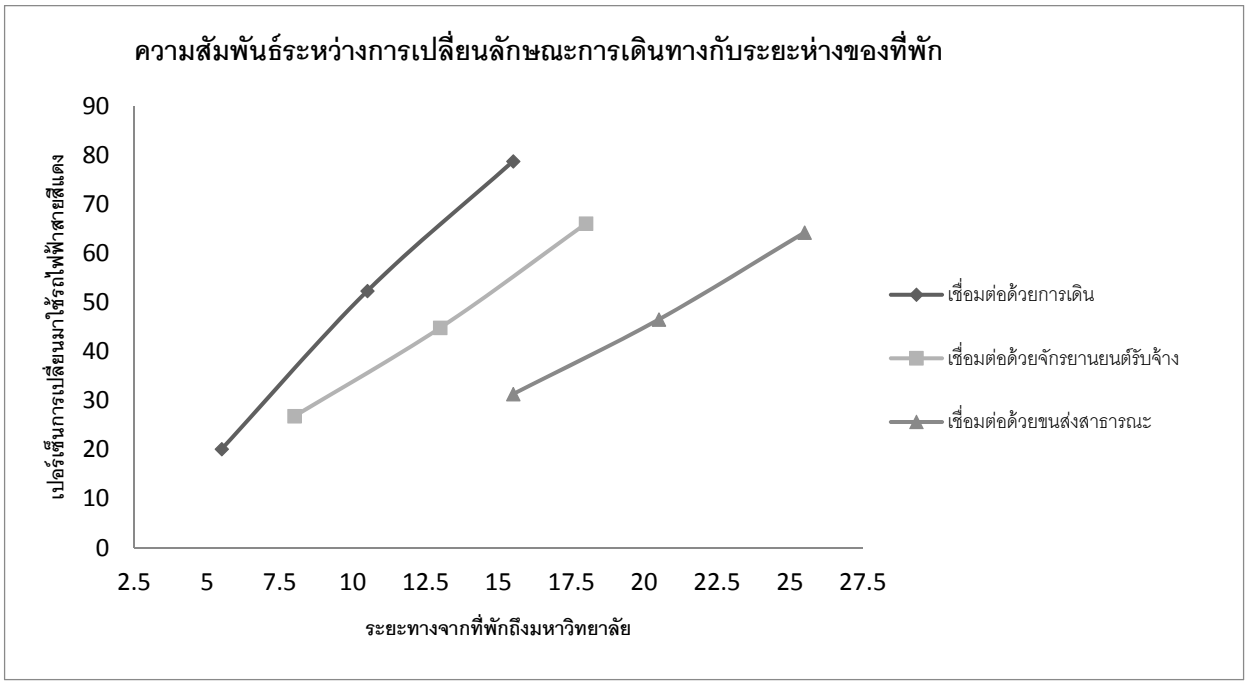


Figure 2 The relationship between the proportion of modal shift from private vehicles to red commuter line and the distance from the originating station to the university clustered by first-mile access modes indicated by distance between home and Kasetsart University.

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลไปสู่รถไฟฟ้าสายสีแดง จำแนกตามประเภทของการเชื่อมต่อจากที่พักมายังสถานีรถไฟฟ้า ได้แก่ การเชื่อมต่อด้วยการเดิน รถจักรยานยนต์รับจ้าง และ ระบบขนส่งสาธารณะ (รูปที่ 1) พบว่าเมื่อระยะทางระหว่างสถานีต้นทางกับมหาวิทยาลัยเพิ่มขึ้น จะทำให้ผู้เดินทางเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางไปสู่รถไฟฟ้าสายสีแดงเพิ่มมากขึ้น โดยในระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร จะมีผู้เปลี่ยนรูปแบบการเดินทางไปสู่รถไฟฟ้าสายสีแดงร้อยละ 20.1 หากเชื่อมต่อโดยการเดิน, ร้อยละ 26.8 หากเชื่อต่อด้วยรถจักรยานยนต์ และร้อยละ 31.3 หากเชื่อมต่อด้วยระบบขนส่งสาธารณะ ที่ระยะทางประมาณ 10 กิโลเมตร จะมีผู้เปลี่ยนรูปแบบการเดินทางไปสู่รถไฟฟ้าสายสีแดงร้อยละ 52.3 หากเชื่อมต่อโดยการเดิน, ร้อยละ 44.8 หากเชื่อมต่อด้วยรถจักรยานยนต์ และร้อยละ 46.5 หากเชื่อมต่อด้วยระบบขนส่งสาธารณะ และที่ระยะทางประมาณ 15 กิโลเมตร จะมีผู้เปลี่ยนรูปแบบการเดินทางไปสู่รถไฟฟ้าสายสีแดงร้อยละ 78.7 หากเชื่อมต่อโดยการเดิน, ร้อยละ 66 หากเชื่อมต่อด้วยรถจักรยานยนต์ และร้อยละ 64.2 หากเชื่อมต่อด้วยระบบขนส่งสาธารณะ ซึ่งจากแนวโน้มจะพบว่ารูปแบบที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางไปสู่รถไฟฟ้าสายสีแดง จากรูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางและระยะห่างระหว่างที่พักถึงมหาวิทยาลัยจำแนกตามรูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างที่พักกับสถานีต้นทาง จะพบว่าผู้ที่เดินทางเชื่อมต่อกับสถานีต้นทางโดยการเดิน มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางไปสู่รถไฟฟ้าสายสีแดงมากกว่า ผู้ที่เดินทางเชื่อมต่อด้วยรถจักรยานยนต์ และ เชื่อมต่อด้วยระบบขนส่งสาธารณะตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

Ortuzar JD. andWillumsen LG. 1994. **Transport Modelling.2nd ed**. John Wiley & Sons, England

Ben-Akiva, SR Lerman – 1985 **Discrete choice analysis: theory and application to travel demand**

การตรวจสอบสารตั้งต้นไตรฮาโลมีเทนในระบบผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

Investigation of Trihalomethanes Precursors in Water Treatment Process of Bangkhen Water Treatment Plant

คุณานนต์ งามถ้อย[1*] ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา[1] และ สุชาติ เหลืองประเสริฐ[1]

Kunanon Ngamthoy[1*], Patcharaporn Suwanvitaya[1] and Suchat Luangprasert[1]

บทคัดย่อ

การตรวจสอบสารตั้งต้นไตรฮาโลมีเทน (THMs) ในระบบผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน เป็นการดำเนินการเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น THMs ซึ่งอาจเกิดจากการปนเปื้อนสาหร่ายหรือความขุ่นในแหล่งน้ำดิบซึ่งจะใช้น้ำดิบใน 2 ช่วงนี้ในการทดลอง พบว่าสารตั้งต้น THMs ได้แก่ กรดฮิวมิค-ฟัลวิค ลดลงในขั้นตอนของการตกตะกอน แต่จะเพิ่มขึ้นในขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคหรือการเติมคลอรีน ปริมาณ THMs ในระบบช่วงที่น้ำดิบมีสาหร่ายปนเปื้อนมีค่าสูงกว่าช่วงที่น้ำดิบมีค่าความขุ่นสูง พบสารกลุ่ม THMs คือ คลอโรฟอร์ม DBCM และ BDCM ความเข้มข้นสูงสุดคือ 32.38, 6.91, 2.20 µg/L ตามลำดับ ในขณะที่ตรวจไม่พบสารโบรโมฟอร์มเลย และจากการทดลองเพื่อหาการเกิด THMs เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาสัมผัสของคลอรีนในน้ำประปา พบว่าเมื่อตั้งน้ำประปาทิ้งไว้ที่มีค่าคลอรีนคงเหลือ 1.4-1.5 mg/L และเก็บตัวอย่างในชั่งโมงที่ 0 1 2 4 และ 8 พบว่าปริมาณสาร THMs มีแนวโน้มที่จะไม่เปลี่ยนแปลง

ABSTRACT

The investigation of Trihalomethanes precursors in Bangkhen Water Treatment Plant is for follow the precursors change that can cause by the algae contaminated or high turbidity in raw water. The results shows that the precursors such as humic-fulvic acid can reduced in sedimentation unit but can also increase when chlorination. THM concentration when raw water contaminate algae is higher than high turbidity water. It can detect highest concentraton of chloroform, DBCM and BDCM are 32.38, 6.91 and 2.20 µg/L respectively but bromoform cannot detect. The other experiment is find the THMs concentration when contact time of residual chlorine (1.4-1.5 mg/L) in tap water is different in 0, 1, 2, 4 and 8 hours. The result shows that the THMs trend is not to change significantly.

Key Words: THM, water treatment, algae, chlorination

*Corresponding author; e-mail address: **k_kunanon@hotmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การประปานครหลวง (กปน.) เป็นองค์กรที่มีหน้าที่ให้บริการน้ำประปาในพื้นที่ 3 จังหวัด อันได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ โดย กปน.มีมาตรฐานคุณภาพน้ำโดยอิงจากมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (WHO) โดยคุณลักษณะน้ำบางประการก็ใช้ค่าควบคุมตามเกณฑ์ที่ WHO กำหนด แต่บางคุณลักษณะก็มีการควบคุมให้เข้มงวดกว่าเกณฑ์ของ WHO เพื่อให้ผู้ใช้น้ำกว่า 2,200,000 ราย ได้รับน้ำประปาที่สะอาดและปลอดภัย โดยกปน.มีโรงงานผลิตน้ำถึง 4 แห่ง แต่โรงงานที่มีกำลังผลิตมากที่สุดคือโรงงานผลิตน้ำบางเขน มีกำลังการผลิตสูงสุดถึง 4.4 ล้านลบ.ม.ต่อวัน น้ำดิบที่ทางโรงงานผลิตน้ำบางเขนใช้ เป็นน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา โดยนำมาผ่านกระบวนการผลิตต่างๆทั้งระบบแยกวัตถุขนาดใหญ่ด้วยตะแกรงหยาบ ตะแกรงละเอียด กระบวนการตกตะกอนด้วยถังตกตะกอนระบบของแข็งสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน การกรองแบบ 2 ตัวกรอง และกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้แก่ สารละลายสารส้ม ปูนขาว ถ่านกัมมันต์แบบผง โพลีเมอร์สำหรับช่วยตกตะกอน คลอรีน เป็นต้น ทั้งนี้ทั้งนั้นการเลือกใช้สารเคมีขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำดิบในแต่ละช่วง

เมื่อแหล่งน้ำดิบของกปน.เป็นแหล่งน้ำผิวดิน และเป็นแหล่งระบายน้ำจากทางตอนเหนือของประเทศลงสู่อ่าวไทย ดังนั้นจึงทำให้คุณลักษณะของน้ำมีการแปรผันได้ตามฤดูกาล เช่นค่าความขุ่นของน้ำดิบตลอดปี อยู่ในช่วง 20-150 NTU เป็นต้น หรือน้ำดิบมีการปนเปื้อนตามฤดูกาลเช่น น้ำดิบปนเปื้อนความเค็มจากน้ำทะเลหนุนสูง หรือน้ำดิบปนเปื้อนสาหร่าย ในช่วงหน้าแล้ง เป็นต้น ทำให้การจัดการการใช้สารเคมีในการผลิตมีความแปรผันไปตามช่วงเวลา โดยสาหร่ายที่พบในน้ำดิบมีหลายชนิด แต่ชนิดที่พบมากที่สุดและเป็นปัญหาต่อกระบวนการผลิตน้ำคือ สาหร่ายไดอะตอม *Aulacoseira* sp. และ *Cyclotella* sp. กับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Oscillatoria* sp.

เนื่องจากการใช้คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำ เมื่อน้ำดิบที่มีสารอินทรีย์ทำปฏิกิริยากับคลอรีน ทำให้สามารถเกิดผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยานั่นคือ สารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane : THMs) ประกอบด้วย คลอโรฟอร์ม โบรโมไดคลอโรมีเทน (BDCM) ไดโบรโมคลอโรมีเทน (DBCM) และโบรโมฟอร์ม โดยสาร THM มีเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐาน WHO ไว้เท่ากับ 300, 60, 100 และ 100 µg/L ตามลำดับ และมีค่าผลรวมของสัดส่วนค่าที่วิเคราะห์ได้ต่อค่ามาตรฐานของสาร (Sums of ratio) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 (WHO,2011)

ปัจจัยในการเกิดสาร THMs เกิดขึ้นได้ในหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นและชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำ ความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ ระยะเวลาสัมผัส พีเอช ดังนั้นการที่น้ำดิบมีการปนเปื้อนทั้งสาหร่าย หรือสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ เช่น กรดฮิวมิค-ฟัลวิค ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปทั้งในดินและในน้ำ โดยดินมีกรดฮิวมิคเป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 60-80 (จิราวรรณ, 2553) ซึ่งกรดฮิวมิค-ฟัลวิคสามารถตรวจได้ด้วยเครื่อง Spectrofluorometer ที่ค่า Emission Wavelenght (Em) ช่วงความยาวคลื่น 425-255 nm และ Excitation Wavelength (Ex) ที่ความยาวคลื่น 250-260 nm (Chen et.al., 2003)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณของสารตั้งต้น THMs ในแต่ละจุดของกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน ในช่วงที่น้ำดิบมีสาหร่ายปนเปื้อน และมีความขุ่นสูง และหาผลของระยะเวลาสัมผัสของคลอรีนคงเหลือในน้ำประปา กับปริมาณสาร THMs เมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษานี้ได้เลือกน้ำดิบและน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง โดยมีจุดเก็บตัวอย่างดังรูป และตาราง (Figure 1, Table 1)

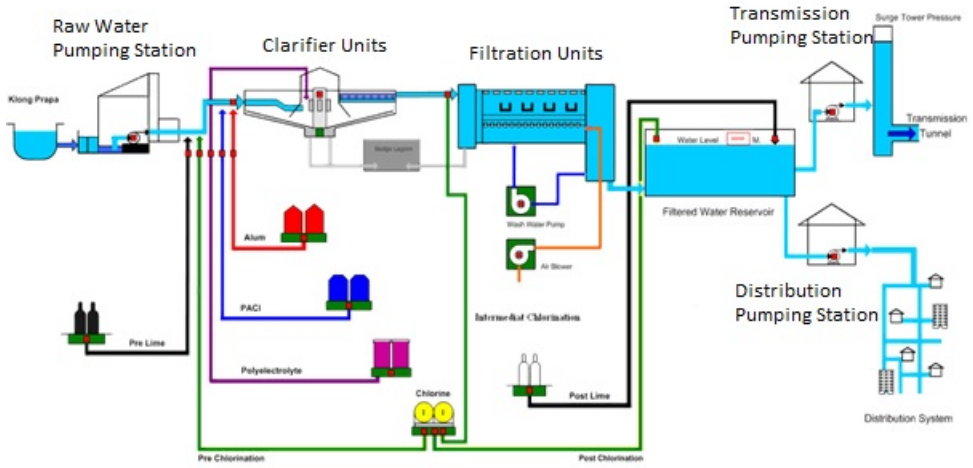


Figure 1 Bangkhen Water Treatment Plant Diagram

Table 1 Detail of Sampling point

Sample Name	Detail
Raw Water (RW)	Raw water of treatment plant before intake station.
Raw Water Production Line 1 (RW1)	Raw water in water production line 1 of treatment plant. This point is after post chlorination injected point.
Clarifier No.3's Effluent (C#3)	Effluent water from clarifier tank no.3. This point is before intermediate chlorination injected point.
Clarifier Water (CW1)	Effluent water from every clarifier tank in water production line 1. This point is after intermediate chlorination injected point.
Filtered Water (FW1)	Effluent water form filtration unit in water production line1. This point is before post chlorination injected point.
Transmission Water (TW1)	Tap water for transmission system. This point is after post chlorination injected point.
Distribution Water (DPS1)	Tap water for distribution system. This point is after post chlorination injected point.

งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1. ตรวจสอบการเกิดสารตั้งต้น THMs เมื่อคุณภาพน้ำเปลี่ยนแปลง และ 2. เพื่อศึกษาสารตั้งต้น THMs ส่งผลอย่างไรต่อการเกิดสาร THMs เมื่อทิ้งระยะเวลาสัมผัสให้นานขึ้นในน้ำประปา

ตรวจสอบการเกิดสารตั้งต้นไตรฮาโลมีเทนเมื่อคุณภาพน้ำเปลี่ยนแปลง

วิเคราะห์หาความเข้มข้นของสาร THMs ที่เกิดขึ้นในระบบผลิตน้ำประปาเพื่อศึกษา และหาความสัมพันธ์ของสารตั้งต้น THMs โดยทำการทดลองใน 2 ช่วงคือ ช่วงที่น้ำดิบมีสาหร่ายปนเปื้อน และช่วงที่น้ำดิบมีความขุ่นสูง ซึ่งทั้งสองช่วงนี้ โรงงานจะมีวิธีผลิตน้ำที่แตกต่างกันไปตามคู่มือปฏิบัติงาน โดยงานวิจัยนี้จะติดตามปริมาณของสาร THMs ในแต่ละจุดของกระบวนการผลิตทั้ง 7 จุด กรดฮิวมิค-ฟัลวิค ปริมาณสาหร่าย

ศึกษาสารตั้งต้นไตรฮาโลมีเทนส่งผลอย่างไรต่อการเกิดสารไตรฮาโลมีเทน เมื่อทิ้งระยะเวลาสัมผัสให้นานขึ้นในน้ำประปา

วิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารไตร THMs ในน้ำประปา โดยใช้น้ำที่จุดเก็บตัวอย่าง TW1 ซึ่งเป็นน้ำสำหรับการสูบส่งไปยังโรงสูบอื่นๆที่ไกลออกไป นำน้ำใส่ภาชนะบรรจุทึบแสง และไม่ให้มีอากาศเข้า-ออก เพื่อไม่ให้คลอรีนเกิดการลายตัว หรือระเหยออกไประหว่างทำการทดลอง ตั้งทิ้งไว้และเก็บตัวอย่างในชั่งโมงที่ 0, 1, 2, 4 และ 8 ชั่วโมง วิเคราะห์ความเข้มข้นของสาร THMs กรดฮิวมัค-ฟัลวิค ปริมาณคลอรีนคงเหลือ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองกรณีน้ำดิบมีการปนเปื้อนสาหร่ายกับปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำระบบผลิต

ในช่วงที่น้ำดิบมีการปนเปื้อนสาหร่ายพบว่า ปริมาณสาหร่ายที่พบได้มากที่สุด 3 ชนิดคือ *Aulacoseira* sp., *Oscillatoria* sp. และ *Cyclotella* sp. โดยในการผลิตจะมีการจ่ายคลอรีนที่จุด Pre Chlorination 2.5 ppm ซึ่งเป็นจุดที่อยู่ก่อนจุดเก็บตัวอย่าง RW1 และที่จุด Intermediate Chlorination 2.1 ppm ซึ่งอยู่ก่อนจุด CW1 และไม่มีการเติมคลอรีนในจุด Post Chlorination มีค่าความขุ่นของน้ำดิบเท่ากับ 19 NTU โดยจุดที่พบความเข้มข้นของสาร THMs ที่สูงที่สุด พบในจุด FW1 ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม เท่ากับ 32.38 µg/L (Table 2) ซึ่งจุดเก็บน้ำตัวอย่าง FW1 เป็นจุดเก็บน้ำที่อยู่หลังกระบวนการ Intermediate Chlorination เมื่อพิจารณากรดฮิวมิค-ฟัลวิค จากการใช้เครื่อง Spectrofluorometer จะพบว่าในจุดเก็บตัวอย่าง C#3 จะไม่พบกรดฮิวมิค-ฟัลวิค และจะตรวจพบอีกครั้งที่จุดเก็บตัวอย่าง CW1 (Figure 2) ซึ่งจุดเก็บตัวอย่าง RW1 เป็นจุดที่ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มสูงขึ้นเนื่องจากผลของการจ่าย Pre Chlorination และความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม BDCM และ DBCM สูงขึ้นหลังจากจุด CW1 และจะมีความเข้มข้นที่สูงขึ้นที่จุดเก็บตัวอย่างถัดไปเพราะระยะเวลาสัมผัสของคลอรีนมีระยะเวลานานขึ้น

Table 2 Algaes and THM concentration in each sampling point when raw water is contaminated by algaes

Sampling Point	Algaes (units/100mL)			THM (µg/L)				
	Aulacoseira sp.	*Oscillatoria* sp.	*Cyclotella* sp.	$CHCl_3$	BDCM	DBCM	$CHBr_3$	Sums of Ratio
RW	8,000	5,100	1,900	0.66	ND	ND	ND	0.00
RW1	13,000	7,400	2,300	5.50	1.42	ND	ND	0.04
C#3	1,920	2,080	0	12.92	2.97	0.98	ND	0.10
CW1	2,000	1,760	80	16.35	4.32	1.14	ND	0.14
FW1	0	0	0	32.38	6.91	2.20	ND	0.25
TW1	0	0	0	23.16	5.87	1.55	ND	0.19
DPS1	0	0	0	20.24	5.20	1.54	ND	0.17

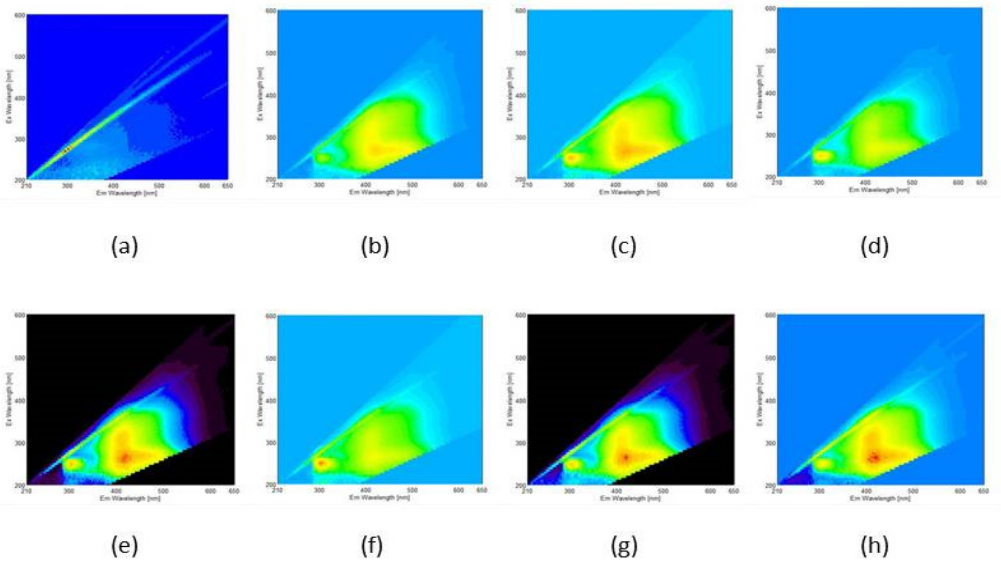


Figure 2 FEEM of (a) DI water (b) RW (c) RW1 (d) C#3 (e) CW1 (f) FW1 (g) TW1 (DPS1) when raw water is contaminated by algaes

ผลการทดลองกรณีน้ำดิบมีค่าความขุ่นสูงกับปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำระบบผลิต

ในช่วงที่น้ำดิบมีค่าความขุ่นสูง ไม่พบปริมาณสาหร่ายปนเปื้อนในน้ำดิบ โดยในการวิจัยพบว่าน้ำดิบมีค่าความขุ่นสูงสุดเท่ากับ 153 NTU ในกระบวนการผลิตน้ำในช่วงนี้จะไม่มีการจ่าย Pre และ Intermediate Chlorination แต่มีการจ่าย Post Chlorination ความเข้มข้น 3.6 ppm มีการใช้สารโพลีเมอร์ร่วมกับสารละลายสารส้มในกระบวนการตกตะกอน พบสาร THMs สูงที่สุดในจุดเก็บตัวอย่าง TW1 โดยพบคลอโรฟอร์มความ

เข้มข้น 15.73 µg/L (Table 3) ส่วนสารฮิวมิค-ฟัลวิคพบว่าในจุดเก็บตัวอย่าง FW1 มีปริมาณน้อยกว่าในจุดเก็บตัวอย่าง CW1 แต่ที่จุดเก็บตัวอย่าง TW1 และ DPS1 มีปริมาณสูงขึ้น (Figure 3)

Table 3 Algaes and THM concentration in each sampling point when raw water has high turbidity

Sampling Point	THM (µg/L)				
	$CHCl_3$	BDCM	DBCM	$CHBr_3$	Sums of Ratio
RW	1.07	ND	ND	ND	0.00
RW1	0.93	0.10	ND	ND	0.00
C#3	1.45	ND	ND	ND	0.00
CW1	1.55	ND	ND	ND	0.01
FW1	2.52	0.20	ND	ND	0.01
TW1	15.73	2.18	ND	ND	0.09
DPS1	7.02	1.15	ND	ND	0.04

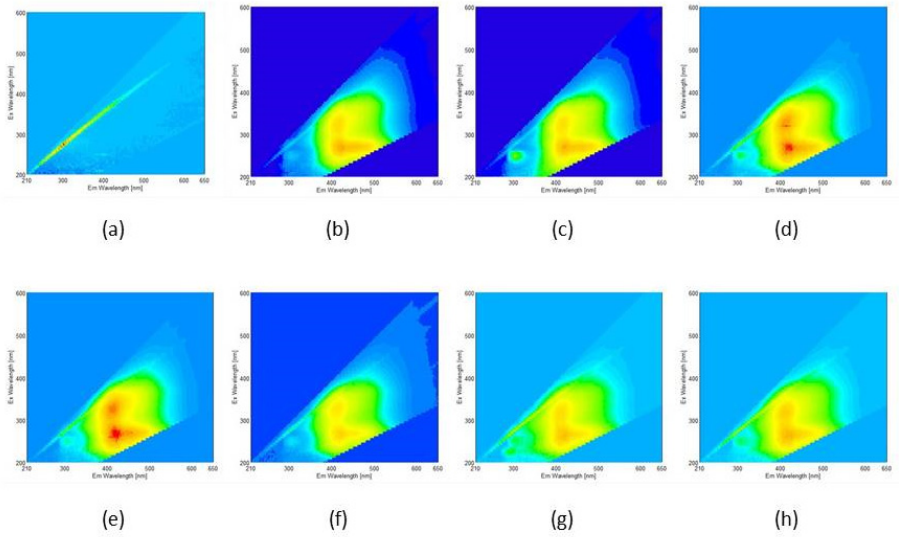


Figure 3 FEEM of (a) DI water (b) RW (c) RW1 (d) C#3 (e) CW1 (f) FW1 (g) TW1 (DPS1) when raw water has high turbidity

จากการทดลองใน 2 ช่วงจะพบว่ากรดฮิวมิค-ฟัลวิค จะถูกลดลงในช่วงการตกตะกอน ซึ่งอาจเกิดจากกรดฮิวมิค-ฟัลวิคถูกรวมไปกับตะกอนและตกตะกอนออกจากน้ำดิบไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Uyak and Toroz (2007) ที่ว่ากระบวนการตกตะกอนสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติได้ แต่ก็จะตรวจพบอีกครั้งในจุดเก็บตัวอย่าง ซึ่งมีการจ่ายคลอรีน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ristoiu et al. (2009) ที่พบว่าความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณคลอรีนสูงขึ้น โดยคลอรีนอาจไปออกซิไดส์สารอินทรีย์ขนาดใหญ่ตัวอื่นกลายมาเป็นกรดฮิวมิค-ฟัลวิค ซึ่งเป็นสารที่มีขนาดเล็กกว่า

ผลการทดลองระยะเวลาสัมผัสของคลอรีนคงเหลือในน้ำประปา กับปริมาณสารไตรฮาโลมีเทน กรณีน้ำดิบมีการปนเปื้อนสาหร่าย

น้ำประปาที่จุดเก็บน้ำตัวอย่าง TW1 ไม่พบสาหร่ายปนเปื้อนในน้ำประปา โดยปริมาณคลอรีนคงเหลือในน้ำประปาเท่ากับ1.4 mg/L และปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนที่พบมากที่สุดคือคลอโรฟอร์มมีค่าเท่ากับ 23.16 µg/L เมื่อทำการตั้งน้ำตัวอย่างทิ้งไว้เป็นเวลา 1, 2, 4 และ 8 ชั่วโมงพบว่าปริมาณคลอรีนคงเหลือเท่ากับ1.2, 1.0, 0.9 และ0.7 mg/Lตามลำดับ และปริมาณสารคลอโรฟอร์มที่พบมีค่าเท่ากับ 25.42, 22.14, 24.63 และ 27.92 µg/L ตามลำดับ (Table 4)

Table 4 Residual Chlorine and THM concentration from TW1 in different contact time when raw water is contaminated by algaes

Sample	Residual Chlorine (mg/L)	THM				
		$CHCl_3$	BDCM	DBCM	$CHBr_3$	Sums of Ratio
CT0	1.4	25.42	5.89	0.17	ND	0.18
CT1	1.2	22.14	5.15	0.94	ND	0.17
CT2	1.0	24.63	6.13	1.05	ND	0.19
CT4	0.9	27.92	6.51	1.89	ND	0.22
CT8	0.7	25.42	5.89	0.17	ND	0.18

CT : Contact time at 0, 1, 2, 4 and 8 hours

ผลการทดลองระยะเวลาสัมผัสของคลอรีนคงเหลือในน้ำประปา กับปริมาณสารไตรฮาโลมีเทน กรณีน้ำดิบมีความขุ่นสูง

น้ำประปาที่จุดเก็บน้ำตัวอย่าง TW1 มีค่าความขุ่น และปริมาณคลอรีนคงเหลือในน้ำประปาเท่ากับ 1.3 NTU และ 1.5 mg/L ตามลำดับ โดยเมื่อเวลาผ่านไป 1, 2, 4 และ 8 ชั่วโมง มีปริมาณคลอรีนคงเหลือเท่ากับ 1.1, 1.0, 0.7 และ 0.6 mg/L ตามลำดับ (Table 5)

Table 5 Residual Chlorine and THM concentration from TW1 in different contact time when raw water has high turbidity

Sample	Residual Chlorine (mg/L)	THM				
		$CHCl_3$	BDCM	DBCM	$CHBr_3$	Sums of Ratio
CT0	1.5	16.21	2.40	ND	ND	0.09
CT1	1.1	12.98	1.88	ND	ND	0.07
CT2	1.0	13.05	2.27	ND	ND	0.08
CT4	0.7	15.35	2.22	ND	ND	0.09
CT8	0.6	16.21	2.40	ND	ND	0.09

สรุป

ในกระบวนการตกตะกอนของสามารถลดปริมาณกรดฮิวมิค-ฟัลวิคลงได้ แต่เนื่องจากมีการใช้คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคจึงทำให้กรดฮิวมิค-ฟัลวิคสามารถตรวจพบได้อีกครั้งหลังจากจุดที่มีการจ่ายคลอรีน และในช่วงที่น้ำดิบมีการปนเปื้อนสาหร่าย มีการเพิ่มปริมาณการใช้คลอรีนเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย ทำให้ปริมาณของสาร THMs มีค่าที่สูงมากกว่าในช่วงที่น้ำดิบมีความขุ่นสูง การตั้งน้ำประปาทิ้งไว้มีแนวโน้มความเข้มข้นของสาร THMs ไม่เปลี่ยนแปลงจากที่เวลา 0 ชั่วโมงมาก ซึ่งเป็นเพราะปริมาณคลอรีนตั้งต้นของการทำปฏิกริยามีค่าน้อย อีกทั้งตลอดการทดลอง ค่าความเข้มข้นของสาร THMs แต่ละชนิด และค่า Sums of ratio ยังไม่ถึงเกณฑ์ควบคุมขององค์การอนามัยโลก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน และฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวงสำหรับการเอื้อเฟื้อสถานที่และให้ความอนุเคราะห์ต่างๆตลอดการทำวิจัย และ ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

จิราวรรณ จานทอง. 2553. **ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาและน้ำสระว่ายน้ำที่ฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร

Chen, W., P. Westerhoff., J.A. Leenheer and K. Booksh. 2003. Fluorescence excitation – Emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. **Environmental Science and Technology** 37: 5701-5710.

Ristoiu, D., U.V. Gunten, A. Mocan, R. Chira, B. Siegfried, M.H. Kovacs and S. VAncea. 2009. Trihalomethane formation during water disinfection in four water supplies in the Some river basin in Romania. **Environ Sci Pollut Res** 16: 55-65.

Uyak, V. and I. Toroz. 2007. Disinfection by-product precursors reductions by various coagulation techniques in Istanbul water supplies. **Journal of Hazardous Materials** 141: 320-328.

World Health Organization. 2011. **Guidelines for Drinking-Water Quality**. 4th ed. WHO press, Malta.

Performance of High-rate Membrane Bioreactor for the Treatment of Polluted Canal Water: Effect of Sponge Media

Davin Sang[1*], Chart Chiemchaisri[1] and Wilai Chiemchaisri[1]

ABSTRACT

This research presents the performance of high-rate membrane bioreactor operated with different bio-carrier materials, i.e. polyurethane (PU) and melamine sponge for removal of organics and ammonia from polluted canal water. Lab-scale experimental system was supplied with actual polluted canal water and it was operated under different hydraulic retention time (HRT) of 3 h and 1 h. The results showed that polyurethane sponge performed better for the removal of organic carbon in comparison to melamine sponge. COD and NH_3-N removal efficiencies of 53.0% and 75.3% were achieved at HRT of 1 h. The results also reveal that organic removals by PU sponge operated at HRT of 1 h were even higher than those of melamine sponge operated at HRT of 3 h. PU sponge also provided higher removal of ammonia by about 20% due to its porous and loose structure for promoting biofilm formation while melamine sponge did not provide good support of biomass attachment at the inner part due to its fine pore structure.

Key words: High rate treatment, Membrane bioreactor, Polluted canal, Sponge media.

*Corresponding author; e-mail address: **davinsang94@gmail.com**

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900.

INTRODUCTION

Canal network in low- lying urban area like Bangkok Metropolitan is considered a closed water circulation system receiving drainage run-off, and untreated or treated water of sewage system containing organic pollutants from domestic and commercial activities. It is a big challenge for management of its water quality considering that its function as a part of flood control system has always been given as a priority. Organic loading into surface water bodies with low exchange capacity can worsen the turbidity, odor, taste, and bio-stability of water even when the discharged wastewater has already been partially treated (Carraro *et al*., 2000). Moreover, high nutrient content in water can lead to algae bloom or eutrophication problem, subsequently deteriorate water qualities, promote the growth of disease-transmitting insects such as mosquitoes, and other artistic or sanitary problems (Chang *et al*., 2010) as well increasing demand of disinfectants during water treatment.

Organic matter containing in polluted canal water can be treated by biological method. Several conventional wastewater treatment system could be applied for the highly polluted water but their treatment performance was found limited especially when operated at short treatment time or high throughput rate. New treatment process has been developed to handle low organic strength wastewater or polluted surface water. Among them, membrane bioreactor (MBR) has applied to low and high strength wastewater treatment in which high biomass concentration is retained in the reactor regardless of water throughput rate thus providing efficient biodegradation and good effluent quality. The MBR treatment of surface water was studied by Li and Chu (2003) and the results showed that 1500 mg/L of biomass concentration in terms of mixed liquor suspended solids (MLSS) leading to 61% removal of total organic carbon (TOC) and 98% nitrification achievement. Moreover, MBR integrated with powdered activated carbon (PAC) could improve the adsorption processes and provide more contact between microorganisms and substrates as suggested by Tian *et al.* (2008). However, operational problem existed with membrane fouling due to high PAC addition. Chang *et al.* (2010) applied non-woven material from used diaper as the carrier for bio-film process to purify the recycled water from landscape pond. The system was unstable and TN was dropped to 15-26% while 68% and 90% of chemical oxygen demand (COD) and suspended solids (SS) were removed, respectively. Recently, Li *et al.* (2017) investigated the performance of MBR for treating polluted surface water by applying polyvinyl alcohol gel (PVA-gel) as a bio carrier to enhance biodegradation capacity, resulting in 54% and 95% removal of COD and NH_3-N, respectively.

The concept of using sponge as moving carrier for biomass attachment in MBR has been recently explored. Incorporation of bio-carrier helped retaining biomass in the reactor while its movement also create shear force on the membrane surface thus prevent the formation of cake layer. Generally, the removal of pollutants in this MBR was performed by both attached and suspended

biomass (Chae *et al*., 2004; Ngo *et al*., 2006; Pascik, 1990; Psoch and Schiewer, 2006). However, attached biomass play an important role in the treatment process and the use of appropriate bio-carrier can promote rapid and stable attachment and growth of microorganisms (Ngo *et al*., 2008). In this research, high rate MBR employing bio-carrier material was applied to the treatment of polluted canal water at laboratory scale. Two different bio-carrier materials, i.e. polyurethane (PU) and melamine sponge, were evaluated on their efficiencies for removing of organic and nitrogen containing in canal water while the development of attached biomass in the system was observed.

MATERIALS AND METHODS

1. Experimental setup

Laboratory-scale experimental system consists of rectangular shaped biological reactor with an operating volume 12 L as shown in Figure 1. An external microfiltration membrane module (5 μm opening cartridge filter) was provided for solid-liquid separation after biological treatment. Polluted canal water obtained from surface pond adjacent to the Faculty of Engineering, Kasetsart University was pumped intermittently from the storage tank into the bioreactor as controlled by a level sensor installed inside the reactor. The biological reactor were operated with bio-carrier using either polyurethane (PU) or melamine sponge. The sponge cubes with the size of 1 x 1 x 1 cm were initially added into the reactor at 10% of reactor volume as suggested in previous research (Guo *et al*., 2009). The reactor was operated at hydraulic retention time (HRT) of 3 h and 1 h during which aeration was constantly supplied in the reactor for to provide sufficient aeration (dissolved oxygen, DO of >4 mg/l) and mixing condition (as observed from sponge movement inside the reactor). The effluent from bioreactor was pumped to the membrane unit and permeated was withdrawn at constant rate through membrane filer and this operation proceeded and controlled by a timer until the desire volume of treated water (for each HRT condition) was achieved.

2. Sampling and analysis

Influent and effluent of the reactor were sampled and analyzed every pre-determined period, i.e. every 2 days during start-up period and every 4 days during steady operation). DO and flow rate were recorded onsite at every sampling time. The water quality analyses, including chemical oxygen demand (COD) before and after filtered through GF/C paper (presented as total COD or TCOD and soluble COD or SCOD respectively), biochemical oxygen demand (BOD), total organic carbon (TOC), suspended solids (SS), and ammonia (NH_3-N) were performed according to the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). The measurement of biomass in the reactor was performed in term of mixed liquor suspended solids (MLSS) for the suspended biomass whereas

attached biomass on the sponge were determined from randomly sampled sponge cubes after being removed by from the sponge media by rinsing with pure water (Luo, 2014).

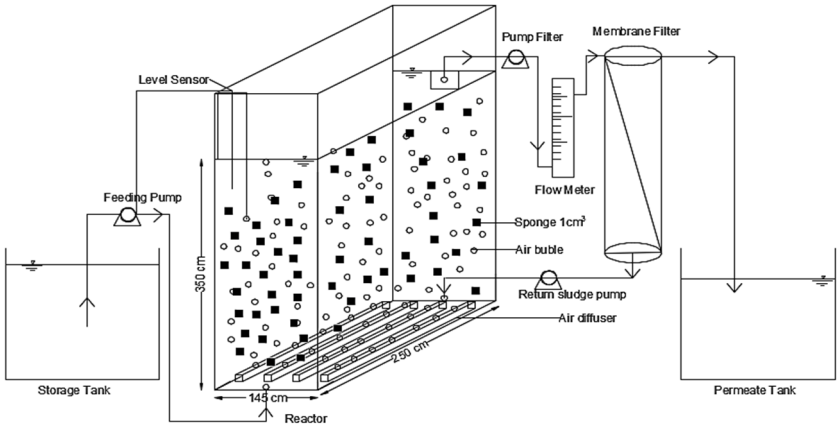


Figure1 Experimental set-up of high-rate membrane bioreactor (MBR)

RESULTS AND DISCUSSION

1. Performance of melamine sponge MBR under different HRT

To determine appropriate HRT for the operation of high-rate MBR, the system was operated at HRT of 3 h and 1 h and their treatment performance were compared. Melamine sponge was used to compare the pollutant removal efficiencies under different HRT condition. The operating period of each condition was set at 30 days. Table 1 shows the characteristics of influent and effluent and removal efficiencies under HRT of 3 h and 1 h. It was found that the treatment efficiencies of the system operated at HRT of 3 h was of higher than those at HRT of 1 h by about 50%. Nevertheless. TCOD and SCOD removal efficiency under both conditions were differ by only 13 %. Base on Meng *et al.* (2007), lower COD removal efficiencies were observed with decreasing HRT. Rahman and Al-Malack (2006) reported that the COD removal efficiencies were not affected when HRT was varied in the range between 17 and 34 h in the MBR system fed with easily biodegradable organic substances. However, COD removal efficiencies of COD was affected from even very small changes of HRT when the system was fed with industrial wastewater (Tay *et al.*, 2003). In this research, polluted canal water contains considerable amount of hardly biodegradable organic substances as suggested by its low BOD/COD (<0.5) characteristics. Meanwhile, NH_3-N removal was observed at higher extent than BOD and COD. They were found to be 57.1 and 87.5% at HRT of 1 and 3 h respectively. Based on these results, it was found that the system could be operated at relatively short HRT of 1-3 h with moderate organic and ammonia removals. Considering the treatment performance achieved, an HRT of 1 h was selected for further study to compare the performance between different type of bio-carrier as of BOD, COD, and NH3 removals were not significant different between both HRT conditions.

Table 1 Comparison of treatment performance at different HRT.

parameter	HRT 1 h			HRT 3 h		
	Influent	Effluent	%Removal	Influent	Effluent	%Removal
SS	17.8±20.1	6.3±6.3	64.4	20.9±11.6	2.9±2.8	86.3
BOD	25.4±1.0	19.4±1.3	23.6	25.0±0.6	17.2±2.2	31.5
TCOD	67.4±20.1	50.0±19.9	25.9	66.7±21.6	41.7±17.5	37.4
SCOD	57.3±11.3	44.8±13.3	21.8	57.3 ±11.3	38.0±14.9	33.7
TOC	12.4±1.7	11.1±2.3	11.1	12.4±1.7	9.0±2.8	27.2
NH_3-N	16.8±1.6	7.2±1.6	57.1	16.8±1.6	2.1±1.8	87.5

Remark: unit: mg/L, operation period (t) = 30 days, No of samples (n) = 15

2. Comparison of the performance of types of sponge media

Two types of bio-carrier materials, i.e. polyurethane (PU) and melamine sponge were compared in this study. Both types of sponge have been reported for its successful operation in MBR applied to low strength wastewater. Similar sponge density were applied (10% per volume of reactor) while the reactor was operated at constant HRT of 1 h. Table 2 shows the comparison of treatment performance between both sponge types. It was found that PU sponge demonstrated higher removal efficiencies in all parameter except SS at which the removal efficiency were similar under both conditions. It was also noted that significant improvement on COD removals (both TCOD and SCOD) was observed when PU sponge was used as compared to melamine sponge as the COD removal efficiencies were averaged at 53.01% and 25.91% for PU and melamine sponge, respectively. Even this COD removal of PU sponge was higher that found for melamine sponge operated at HRT of 3 h in the previous run. Côté et al. (1998) reported that higher COD removal efficiencies were attained when F/M ratio in the biological reactor decreased. Oppositely, when the experiment was performed under high F/M ratio similar in this high rate MBR, only moderate COD removals could be achieved. DO in the reactor detected during the operation were found varied in the range of 4.5 to 6 mg/l which was not limited for nitrification reaction thus resulting in high ammonia removals. Feng et al. (2012) reported that when looser structure of the biofilm exists, DO and nitrate could easily penetrate into the inner parts of the carriers, providing more site for nitrifier growth, which would improve ammonia removal. In this study, PU sponge provided higher removal of ammonia than melamine sponge by about 20% due to its porous and looser structure of biofilm. Meanwhile, melamine sponge had a fine pore structure which hardly adsorbed suspended solids.

Chu and Wang (2011) compared PU and biodegradable polymer polycaprolactone (PCL) as bio-carrier and indicated that PU sponge could remove COD and ammonia better than PCL by about 18% and 10% respectively.

Table 2 Comparison of treatment performance between PU and melamine sponge at HRT of 1 h

parameter	PU sponge (10% reactor volume)			melamine sponge (10% reactor volume)		
	Influent	Effluent	%Removal	Influent	Effluent	%Removal
SS	23.8±11.3	9.0±5.8	62.2	17.8±20.1	6.3±6.3	64.40
BOD	24.0±7.0	16.3±6.0	32.2	25.4±1.0	19.4±1.3	23.57
TCOD	68.3±28.2	32.1±17.2	53.0	67.4±20.1	45.0±19.9	25.91
SCOD	40.9±24.2	21.3±15.6	48.1	57.3±11.3	44.8±13.3	21.75
TOC	12.0±2.3	9.2±1.4	23.4	12.4±1.7	11.1±2.3	11.1
NH_3-N	26.5±11.5	6.5±3.6	75.3	16.8±1.6	7.2±1.58	57.14

Remark: unit: mg/L, PU (t = 36 days, n=12), melamine (t = 30 days, n=15)

Figure 2 Microscopic view and visual view before and after used of PU sponge

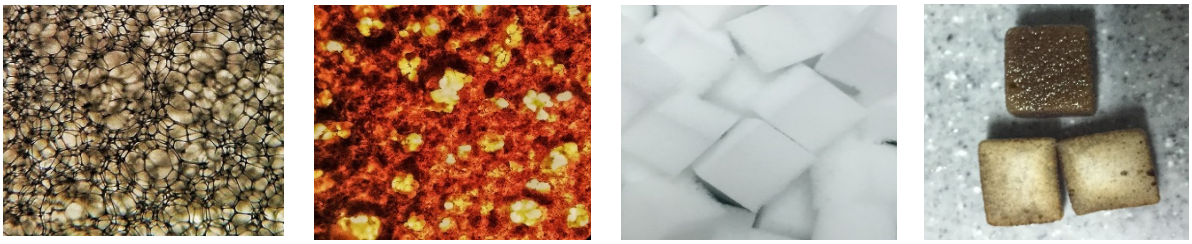


Figure 3 Microscopic view and visual view of biomass growth before and after operation of melamine

Similarly in this research, PU sponge was found to be a better bio-carrier materials than melamine sponge. The different in its performance could be due to their pore structure with different capability to hold up biomass within their matrix. Visual observation of attached biomass on both types of sponge were found to be different. As the attached biomass were found only on the surface of melamine cube (Figure 2), deeper penetration of biomass into the inner part of PU sponge was observed (Figure 3). The MLSS in PU sponge performed higher than melamine sponge in ratio of 2.5.

The average concentration of biomass in PU and melamine sponges were 9570 and 3800 mg per total sponge in reactor, respectively.

CONCLUSION

This research demonstrated that the polyurethane (PU) sponge could be sucessfully applied as bio-carrier in high-rate MBR for the treatment of polluted canal water. The experimental results over one month period showed that polyurethane sponge could moderately remove TCOD at 53.0% at HRT of 1 h. Meanwhile, only 25.9% of TCOD was removed by melamine sponge. Moreover, PU sponge could remove ammonia better than melamine sponge by about 20%. Higher treatment efficiencies of PU sponge could be due to better biomass attachment formation on its porous and looser structure as majority of the treatment in the system was performed by attached biomass. Further research will be needed to optimize the operation of the sponge within the reactor to enhance its treatment capacities and sustain the operation in long-term.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by Collaborative Research budget from ASEAN University Network/ Southeast Asia Engineering Education Development Network (AUN/SEED-Net).

REFERENCES

APHA, WEF, 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd ed. American Public Health Association, Washington, DC.

Carraro, E., E. Bugliosi, L. Meucci, C. Baiocchi and G. Gilli. .2000Biological drinking water treatment processes, with special reference to mutagenicity. **Water Research**. .3054-3042 :(11)34

Chae, K., S. Yim and K. Choi. .2004Application of a sponge media (biocube) process for upgrading and expansion of existing caprolactam wastewater treatment plant for nitrogen removal. **Water Science and Technology**. .171-163 :(6)50

Chang, C.-Y., J.-S. Chang, C.-M. Chen, C. Chiemchaisri and S. Vigneswaran. .2010An innovative attached-growth biological system for purification of pond water. **Bioresource technology**. .1510-1506 :(5)101

Chu, L. and J. Wang. .2011Comparison of polyurethane foam and biodegradable polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low c/n ratio. **Chemosphere**. :(1)83 .68-63

Côté, P., H. Buisson and M. Praderie. .1998Immersed membranes activated sludge process applied to the treatment of municipal wastewater. **Water Science and Technology**. .442-437 :(5-4)38

Feng, Q., Y. Wang, T. Wang, H. Zheng, L. Chu, C. Zhang, H. Chen, X. Kong and X.-H. Xing. .2012 Effects of packing rates of cubic-shaped polyurethane foam carriers on the microbial community and the removal of organics and nitrogen in moving bed biofilm reactors. **Bioresource technology**. .207-201)117

Guo, W., H.-H. Ngo, C.G. Palmer, W. Xing, A.Y.-J. Hu and A. Listowski. .2009Roles of sponge sizes and membrane types in a single stage sponge-submerged membrane bioreactor for improving nutrient removal from wastewater for reuse. **Desalination**. .676-672 :(2)249

Li, L., S. Suwanate and C. Visvanathan. .2017Performance evaluation of attached growth membrane bioreactor for treating polluted surface water. **Bioresource Technology**.

Li, X.-y. and H.P. Chu. .2003Membrane bioreactor for the drinking water treatment of polluted surface water supplies. **Water Research**. .4791-4781 :(19)37

Luo, Y. 2014. A sponge-based moving bed bioreactor for micropollutant removal from municipal wastewater.

Meng, F., B. Shi, F. Yang and H. Zhang. .2007Effect of hydraulic retention time on membrane fouling and biomass characteristics in submerged membrane bioreactors. **Bioprocess and Biosystems Engineering**. .367-359 :(5)30

Ngo, H.-H., W. Guo and W. Xing. .2008Evaluation of a novel sponge-submerged membrane bioreactor (ssmbr) for sustainable water reclamation. **Bioresource technology**. -2429 :(7)99 .2435

Ngo, H., M. Nguyen, N. Sangvikar, T. Hoang and W. Guo. .2006Simple approaches towards the design of an attached-growth sponge bioreactor (agsb) for wastewater treatment and reuse. **Water science and Technology**. .197-191 :(12-11)54

Pascik, I. .1990Modified polyurethane carriers for biochemical waste water treatment. **Water science and technology**. .42-33 :(2-1)22

Psoch, C. and S. Schiewer. .2006Direct filtration of natural and simulated river water with air sparging and sponge ball application for fouling control. **Desalination**. .204-190 :(3-1)197

Rahman, M.M. and M.H. Al-Malack. .2006Performance of a crossflow membrane bioreactor (cf–mbr) when treating refinery wastewater. **Desalination**. .26-16 :(3-1)191

Tay, J.-H., J.L. Zeng and D.D. Sun. .2003Effects of hydraulic retention time on system performance of a submerged membrane bioreactor. **Separation science and technology**. .868-851 :(4)38

Tian, J.-y., H. Liang, Y.-l. Yang, S. Tian and G.-b. Li. .2008Membrane adsorption bioreactor (mabr) for treating slightly polluted surface water supplies: As compared to membrane bioreactor (mbr). **Journal of Membrane Science**. .270-262 :(1)325

ผลของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ต่อสมรรถนะของปฏิกิริยาการแตกตัวน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งในปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดชนิดไหลเวียนลง

Effect of Hydrodynamics Behavior on the Performance of Catalytic Cracking of Heavy Oil in Co-Current Downflow Circulating Fluidized Bed Reactor

สุภาวดี ราชสมบัติ[1] สุนันท์ ลิ้มตระกูล[2] เทอดไทย วัฒนธรรม[2] และ ปริญญา คงพรม[1*]

Supawadee Ratchasombat[1], Sunun Limtrakul[2], Terdthai Vatanatham[2] and Parinya Khongprom[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะของปฏิกิริยาการแตกตัวน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งในปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดชนิดไหลเวียนลงด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบบจำลองที่ใช้คือ แบบจำลองของไหลสองชนิดร่วมกับทฤษฎีจลน์ของการไหลของอนุภาคแกรนูลาร์ พบว่า ที่บริเวณกลางท่อ (Core region) ค่าสัดส่วนอนุภาคต่ำและความเร็วก๊าซต่ำ ทำให้ค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำมันหนักมีค่าสูงและมีความสม่ำเสมอ แต่ที่บริเวณใกล้ผนัง (Annulus region) ค่าสัดส่วนอนุภาคสูงและความเร็วก๊าซสูง แต่ค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักมีค่าต่ำ แสดงว่าค่าสัดส่วนอนุภาคส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าความเร็วก๊าซ เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลวนของอนุภาค (Gs) พบว่า Gs ส่งผลอย่างมากต่อค่าสัดส่วนอนุภาค ดังนั้นการกระจายค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนัก จึงขึ้นกับการกระจายค่าสัดส่วนอนุภาคภายในระบบ แต่เมื่อศึกษาผลของความเร็วก๊าซป้อน (Ug) พบว่า Ug ส่งผลต่อการกระจายค่าสัดส่วนอนุภาคและความเร็วก๊าซภายในระบบ ดังนั้นการกระจายค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักจึงขึ้นอยู่กับค่าสัดส่วนอนุภาคและความเร็วก๊าซภายในระบบ

ABSTRACT

The objective of this research is to study the performance of catalytic cracking of heavy oil in co-current downflow circulating fluidized bed reactor using Computational Fluid Dynamics (CFD). Two-fluid model with the kinetic theory of granular flow was adopted. It was found that the core-annulus flow pattern was observed. In the core region, low solid fraction with uniform distribution and low gas velocity leads to high heavy oil mass fraction with uniform distribution. In annulus region, high solid fraction and high gas velocity was obtained. However, heavy oil mass fraction is high indicating that solid fraction is more dominate on chemical reaction than gas velocity. Gs significantly affects on the solid fraction. Thus the heavy oil mass fraction strongly depends on the solid fraction distribution. Inlet gas velocity notably affects on the solid fraction and gas velocity. Therefore, the heavy oil mass fraction depends on the solid fraction and gas velocity distributions.

Key Words: catalytic cracking, CFD, fluidized bed reactor, simulation

*Corresponding author; e-mail address: **parinya.k@sci.kmutnb.ac.th**

[1]ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

[1]Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดชนิดไหลเวียนลง (Co-current downflow circulating fluidized bed reactor) หรือปฏิกรณ์ดาวเนอร์ เป็นปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยวัฏภาคก๊าซและอนุภาคของแข็ง โดยก๊าซและอนุภาคป้อนเข้าสู่ระบบที่บริเวณด้านบนและไหลลงด้านล่างในทิศทางเดียวกัน และออกจากระบบที่ด้านล่างของปฏิกรณ์ จากระบบการป้อนดังกล่าว ทำให้พฤติกรรมการไหลในปฏิกรณ์ดาวเนอร์ใกล้เคียงการไหลอุดมคติแบบปลั๊ก (Ideal plug flow) (Wang *et al*., 2016) มีเวลาพำนักของก๊าซและอนุภาคต่ำและมีการกระจายตัวของค่าเวลาพำนักแคบ (Khanali *et al*., 2014) ดังนั้นปฏิกรณ์ดังกล่าวจึงเหมาะสำหรับดำเนินการปฏิกิริยาที่เกิดอย่างรวดเร็วและมีสารขั้นกลางเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวของไหลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid catalytic cracking, FCC) (Liu *et al*., 2006) กระบวนการดังกล่าวเป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น น้ำมันหนัก (Heavy oil) ให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นสารผสมที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจำนวนมากมาย ดังนั้นจึงนิยมแบ่งกลุ่มของสารภายในระบบตามจุดเดือดของสาร โดยเรียกสารแต่ละกลุ่มว่า Lump (Lopes *et al*., 2011) Songip *et al*. (1994) ได้นำเสนอแบบจำลอง 4 กลุ่ม (4-lump model) สำหรับจำแนกสารภายในระบบการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันหนักที่ได้จากขยะพลาสติก ซึ่งประกอบด้วยสารตั้งต้นคือ น้ำมันหนัก (Heavy oil, C>12) แตกตัวได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline, 5<C<11) แก๊สน้ำหนักเบา (Light gas, 1<C<4) และถ่านโค้ก (Coke) ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นการเปลี่ยนขยะพลาสติกให้กลายเป็นแก๊สโซลีนซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานพาหนะได้

ปัจจุบันการศึกษาพฤติกรรมการไหลโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นที่นิยมมากขึ้น วิธีดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบแบบหลายวัฏภาคเช่น ระบบของเหลว-ก๊าซ ระบบก๊าซ-อนุภาคของแข็ง (Behjat *et al*., 2011) Liu et al. (2006) ได้พัฒนาแบบจำลองของไหลสองชนิดเพื่อใช้ในการทำนายการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ดาวเนอร์ แบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายพฤติกรรมการไหลและสมรรถนะของปฏิกรณ์ดังกล่าวได้อย่างน่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่มีการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการไหลและการถ่ายโอนมวลในระบบ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการออกแบบปฏิกรณ์หรือการขยายขนาดปฏิกรณ์ดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็ง เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการไหลต่อสมรรถนะของปฏิกิริยาดังกล่าว

อุปกรณ์และวิธีการ

รูปร่างของปฏิกรณ์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปร่างของปฏิกรณ์ที่ศึกษามีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.127 เมตร และสูง 5 เมตร ปฏิกรณ์ดังกล่าวป้อนก๊าซและอนุภาคเข้าระบบที่ด้านบนและทางออกของก๊าซและอนุภาคอยู่ด้านล่าง พฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์และการถ่ายโอนมวลทำนายโดยใช้แบบจำลองของไหลสองชนิด (Two-fluid model) โดยแบบจำลองดังกล่าวจะพิจารณาให้แต่ละเฟสเป็นเฟสต่อเนื่องที่สามารถไหลซึมผ่านซึ่งกันและกันได้คล้ายของไหล และประยุกต์ใช้ทฤษฎีจลน์ของการไหลของอนุภาคแกรนูลาร์ (Kinetic theory of granular flow)

Table 1 Governing equation

1. Continuity equation

Gas phase : $\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) = 0$ (1)

Solid phase : $\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) = 0$ (2)

2. Momentum conservation equation

Gas phase : $\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g^2) = -\varepsilon_g \cdot \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau_g}} + \varepsilon_g \rho_g \vec{g} + K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s)$ (3)

Solid phase : $\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s^2) = -\varepsilon_s \cdot \nabla p - \nabla \cdot p_s + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau_s}} + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} + K_{gs}(\vec{v}_s - \vec{v}_g)$ (4)

3. Granular temperature conservation equation

$\frac{3}{2}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \Theta_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \Theta_s)\right] = \left(-P_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s\right) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\Theta s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\Theta s}$ (5)

4. The species conservation equation : $\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g C_{g,i}) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g v_g C_{g,i}) = \nabla \cdot (\varepsilon_g \Gamma_i \nabla C_{g,i}) + r_i$ (6)

สำหรับทำนายคุณสมบัติเชิงของไหลของเฟสอนุภาค เช่น ความดันและความหนืดของอนุภาค เป็นต้น สมการควบคุมแสดงดัง Table 1 และสมการเสริมแสดงรายละเอียดในงานวิจัยของวิมลอรรถ (Wimon-ath, 2014) ระบบสมการต่าง ๆ ถูกแก้โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ Ansys-Fluent โดยพิจารณาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดเป็นแบบ 2 มิติ แก้ระบบสมการโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม (Finite volume method) ร่วมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบซิมเปิล (SIMPLE method) ซึ่งจำนวนกริดที่เหมาะสมที่ใช้ในการคำนวณคือ 200x50 กริด (Wimon-ath, 2014)

จลนศาสตร์ของการแตกตัวน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็ง

การแตกตัวน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองคือ 4-lump model สำหรับศึกษาการแตกตัวของน้ำมันหนักที่ได้จากขยะพลาสติก ซึ่งนำเสนอโดย Songip *et al*. (1994) แบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วยน้ำมันหนัก แก๊สโซลีน แก๊สน้ำหนักเบา และโค้ก แบบจำลองดังกล่าวแสดงดัง Figure 1 กฎอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ปฏิกิริยาและค่าพลังงานกระตุ้นแสดงดัง Table 2 และ 3 ตามลำดับ

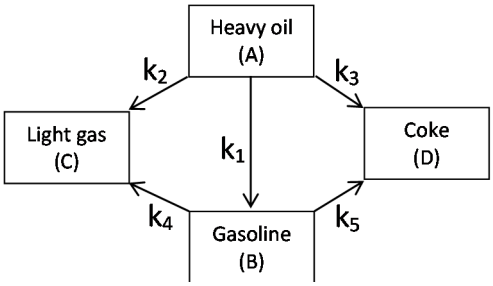


Figure 1 4-lumps model

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ขั้นตอนสำคัญสำหรับการศึกษาโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบสมรรถนะของปฏิกรณ์ที่ได้จากการจำลองแบบเทียบกับสมรรถนะที่ได้จากปฏิกรณ์อุดมคติ ดังแสดงใน Figure 2 พบว่าสมรรถนะของปฏิกรณ์

Table 2 Reaction rate law (Songip *et al*., 1994)

Lump	Rate law
Heavy oil (A)	$r_A' = -(k_1 + k_2 + k_3)C_A^2$
Gasoline (B)	$r_B' = k_1 C_A^2 - (k_4 + k_5)C_B$
Light gas (C)	$r_C' = k_2 C_A^2 + k_4 C_B$
Coke (D)	$r_D' = k_3 C_A^2 + k_5 C_B$

Table 3 Frequency factor and activation energy of each reaction path way (Songip *et al*., 1994)

Second order reaction	K_0 (m^6/kg.kg_{cat}.h)	Ea (kJ/mol)
A $\longrightarrow$ B : k_1	1.98×10^6	50.7
A $\longrightarrow$ C : k_2	5.9×10^7	75.5
A $\longrightarrow$ D : k_3	68.027	18.5
First order reaction	K_0 (m^3/kg_{cat}.h)	**Ea (kJ/mol)**
B $\longrightarrow$ C : k_4	1489	35.1
B $\longrightarrow$ D : k_5	234.51	42.1

ดาวเนอร์ใกล้เคียงปฏิกรณ์อุดมคติแบบปลั๊ก (Ideal plug flow reactor) มากกว่าปฏิกรณ์อุดมคติแบบผสม (Ideal mixed flow reactor) ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการไหลในปฏิกรณ์ดาวเนอร์มีลักษณะใกล้เคียงกับปฏิกรณ์อุดมคติแบบปลั๊ก (Liu *et al*., 2006) จากนั้นได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบกับการทดลองของ Songip *et al*. (1994) พบว่าค่าที่ได้จากการจำลองแบบและค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายสมรรถนะของปฏิกรณ์ดาวเนอร์สำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งได้

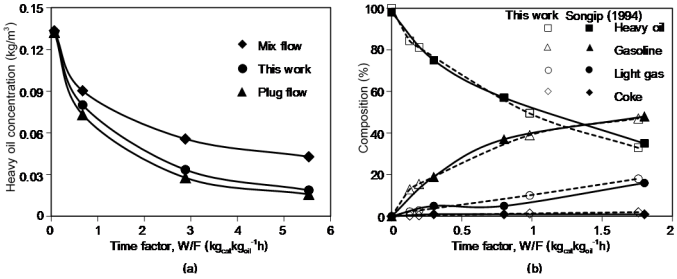


Figure 2 Comparison of reactor performance between this simulation results and ideal reactor (a) and the experimental results (b)

พฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์และการถ่ายโอนมวลของปฏิกิริยาการแตกตัวน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดเป็นปฏิกรณ์ที่มีพฤติกรรมที่ซับซ้อนเนื่องจากระบบประกอบด้วยหลายวัฏภาค นอกจากนี้หากมีปฏิกิริยาร่วมด้วย ระบบจะมีความซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากมีการถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นภายในระบบ ดังนั้นการศึกษาในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์และการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในระบบ Figure 3 แสดงคอนทัวร์และเวกเตอร์พล๊อตของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์และการกระจายความเข้มข้นของสารภายในระบบ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคดัง Figure 3 (a)

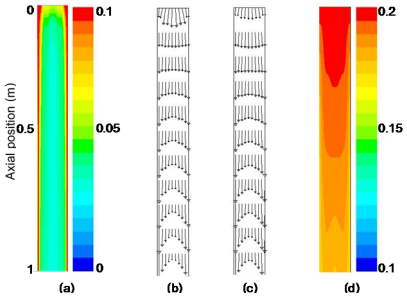


Figure 3 Contour of solid volume fraction (a), velocity vector of gas (b), solid (c) and contour of heavy oil mass fraction (d)

พบว่า การกระจายค่าสัดส่วนอนุภาคเป็นแบบ core-annulus โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอและเบาบางที่บริเวณกลางท่อ (Core region) และมีการรวมตัวของอนุภาคอยู่อย่างหนาแน่นที่บริเวณใกล้ผนังปฏิกรณ์ (Annulus region) เมื่อพิจารณาเวกเตอร์พล๊อตของค่าความเร็วก๊าซและอนุภาคดัง Figure 3 (b) และ (c) พบว่าที่บริเวณใกล้ทางเข้า ความเร็วก๊าซและอนุภาคกระจายตัวแบบพาราโบลา คือมีความเร็วสูงที่บริเวณกลางท่อและค่าความเร็วลดลงตามระยะทางในแนวรัศมี จากนั้นการกระจายความเร็วค่อย ๆ พัฒนาจนมีความสม่ำเสมอตามแนวรัศมี และที่ระยะต่ำลงมา ก๊าซและอนุภาคมีความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคลัสเตอร์ของอนุภาคที่บริเวณใกล้ผนัง ส่วน Figure 3 (d) แสดงคอนทัวร์ของการกระจายค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักพบว่า สัดส่วนเชิงมวลน้ำมันหนักมีค่าสูงที่บริเวณทางเข้าและมีค่าลดลงตามความสูงของปฏิกรณ์เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวกลายเป็นผลิตภัณฑ์

Figure 4 (a-c) แสดงการกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาค ความเร็วก๊าซและอนุภาค และค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักที่ความสูงต่าง ๆ ของปฏิกรณ์ ตามลำดับ พบว่า การกระจายค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคมีลักษณะเป็นแบบ core-annulus สอดคล้องกับค่าคอนทัวร์แสดงดัง Figure 3 (a) โดยอนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอที่บริเวณกลางท่อและมีการรวมตัวกันอย่างหนาแน่นที่บริเวณใกล้ผนัง ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถพบได้ในปฏิกรณ์ดาวเนอร์ดังงานวิจัยก่อนหน้า (Khongprom *et al.*, 2012) และอนุภาคมีการรวมตัวใกล้ผนังมากขึ้นตามความสูงของปฏิกรณ์ เมื่อพิจารณาการกระจายความเร็วก๊าซและอนุภาคตามแนวรัศมี พบว่า ทั้งความเร็วก๊าซและอนุภาคมีค่าต่ำที่บริเวณกลางท่อและมีค่าสูงที่บริเวณใกล้ผนัง จากการพิจารณาการกระจายตัวของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ พบว่า การกระจายของอนุภาคส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณใกล้ผนังเนื่องจากมีการสะสมตัวของอนุภาคอยู่อย่างหนาแน่น แต่ความเร็วก๊าซที่สูงที่บริเวณใกล้ผนัง ทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาของก๊าซน้อย ในทางกลับกัน ที่บริเวณกลางท่อซึ่งเป็นบริเวณที่ก๊าซและอนุภาคมีความเร็วต่ำ ซึ่งช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยา แต่ที่บริเวณดังกล่าวมีค่าสัดส่วนอนุภาคต่ำ ดังนั้นจะเห็นว่าอิทธิพลของค่าสัดส่วนอนุภาคและค่าความเร็วก๊าซส่งผลหักล้างกันทั้งในบริเวณกลางท่อและที่บริเวณใกล้ผนัง ซึ่งผลของพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ต่อการเกิดปฏิกิริยาในระบบสามารถดูได้จากการกระจายค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักที่ความสูงต่าง ๆ ดัง Figure 4 (c) พบว่า ที่ y = 0.5 และ 1.0 m การกระจายค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนัก มีความสม่ำเสมอที่บริเวณกลางท่อ แสดงว่าอิทธิพลของค่าสัดส่วนอนุภาคและค่าความเร็วก๊าซต่อการเกิดปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน สามารถหักล้างกันได้พอดี ส่วนที่บริเวณข้างผนังค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักมีค่าลดลง แสดงว่าผลของค่าสัดส่วนอนุภาคมีค่ามากกว่าผลอันเนื่องมาจากความเร็วก๊าซที่สูง เมื่อพิจารณาที่ความสูง y = 2.0 m ซึ่งเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาเกิดช้าลง เพราะความเข้มข้นของสารตั้งต้นน้อยลง พบว่า

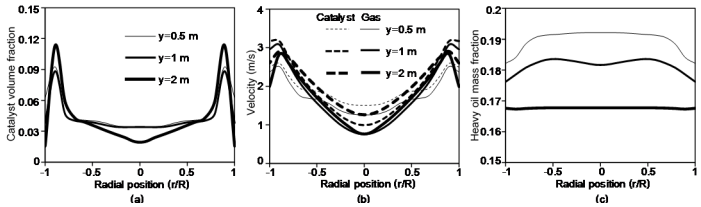


Figure 4 Radial distribution on solid volume fraction (a), gas and solid velocities (b) and heavy oil mass fraction (c)

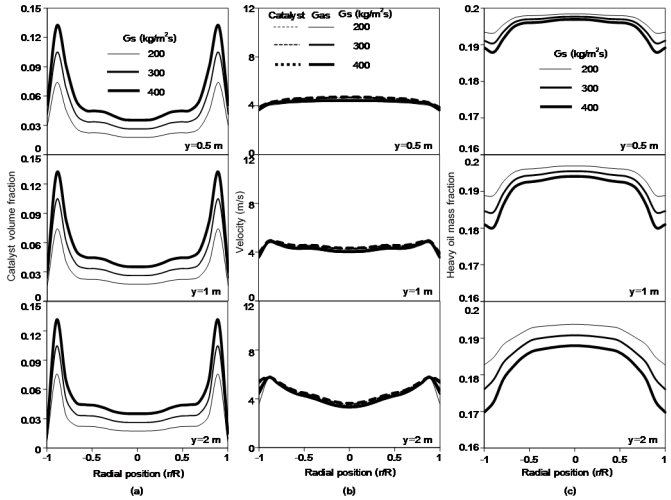


Figure 5 Effect of solid circulating rate on the radial distribution of solid volume fraction (a), gas and solid velocities (b) and heavy oil mass fraction (c)

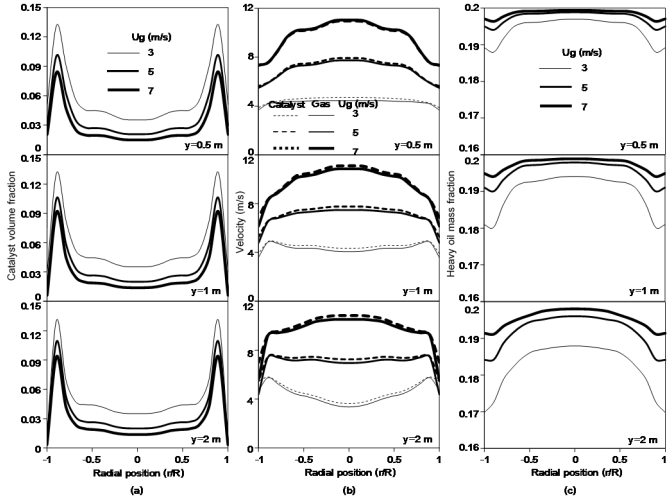


Figure 6 Effect of superficial gas velocity on the radial distribution of solid volume fraction (a), gas and solid velocities (b) and heavy oil mass fraction (c)

การกระจายค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักมีความสม่ำเสมอตลอดแนวรัศมี แสดงว่าค่าสัดส่วนอนุภาคและความเร็วก๊าซส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน จึงหักล้างกันได้พอดี

ผลของอัตราการไหลวนของตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งต่อสมรรถนะของการแตกตัวของน้ำมันหนัก

สภาวะดำเนินการสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์คือ อัตราการไหลวนของอนุภาคของแข็ง (Solid circulation rate, Gs) ดังนั้นหัวข้อนี้จึงศึกษาผลของปัจจัยดังกล่าวต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์และการเกิดปฏิกิริยาภายในระบบดัง Figure 5 พบว่า Gs ส่งผลอย่างมากต่อค่าสัดส่วนอนุภาค โดยค่าสัดส่วนอนุภาคมี

ค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม Gs นอกจากนี้ยังพบว่า อนุภาคมีการรวมตัวที่บริเวณใกล้ผนังมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Khongprom *et al*., 2012) เมื่อพิจารณาผลของ Gs ต่อการกระจายค่าความเร็วของก๊าซและอนุภาคพบว่า การเพิ่ม Gs ทำให้ความเร็วก๊าซและอนุภาคเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาผลของ Gs ต่อการกระจายค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนัก (Figure 5 (c)) พบว่า การเพิ่ม Gs ทำให้ค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่ม Gs ทำให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่เพิ่มความเร็วก๊าซเพียงเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อศึกษาผลของ Gs การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารภายในระบบจึงขึ้นอยู่กับการกระจายค่าสัดส่วนอนุภาค เมื่อพิจารณาที่ y = 0.5 m พบว่าค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักมีความสม่ำเสมอที่บริเวณกลางท่อ เนื่องจากมีปริมาณอนุภาคน้อย และค่าสัดส่วนเชิงมวลมีค่าต่ำที่บริเวณใกล้ผนัง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอนุภาคอยู่อย่างหนาแน่น อีกทั้งยังเป็นบริเวณที่ก๊าซมีความเร็วต่ำ เมื่อพิจารณาที่ความสูงต่ำลงมา (y = 1.0 และ 2.0 m) พบว่าลักษณะการกระจายตัวคล้ายกัน แต่มีความสม่ำเสมอน้อยลง ดังจะเห็นได้จากค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักมีค่าลดต่ำลงมากขึ้น

ผลของความเร็วก๊าซป้อนต่อสมรรถนะของการแตกตัวของน้ำมันหนัก

Figure 6 แสดงอิทธิพลของความเร็วก๊าซป้อนต่อการกระจายตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาค ความเร็วของก๊าซและอนุภาค และค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักที่ความสูงต่าง ๆ พบว่าความเร็วก๊าซป้อนส่งผลอย่างมากต่อพฤติกรรมไฮโดรไดนามิกส์ โดยค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดความเร็วก๊าซป้อน แต่ความเร็วก๊าซและอนุภาคมีค่าลดลงเมื่อลดความเร็วก๊าซป้อน ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของความเร็วก๊าซป้อนพบว่า ทั้งค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคและค่าความเร็วก๊าซส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในระบบ โดยเมื่อลดความเร็วก๊าซป้อนส่งผลให้ค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักมีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากค่าสัดส่วนอนุภาคที่เพิ่มขึ้นและค่าความเร็วก๊าซที่ลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักพบว่า ความสม่ำเสมอของการกระจายตัวน้อยลงเมื่อลดความเร็วก๊าซป้อน เนื่องจากการสะสมตัวของอนุภาคบริเวณข้างผนังมีค่ามากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อลดความเร็วก๊าซป้อน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดมากที่บริเวณดังกล่าว

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะของปฏิกิริยาการแตกตัวน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งในปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดชนิดไหลเวียนลงโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบบจำลองที่ใช้คือแบบจำลองของไหลสองชนิดร่วมกับทฤษฎีจลน์ของการไหลของอนุภาคแกรนูลาร์ ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะการไหลภายในระบบเป็นแบบ core-annulus โดยที่บริเวณกลางท่อ (Core region) อนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่วนที่บริเวณใกล้ผนัง (Annulus region) มีการรวมตัวของอนุภาคอย่างหนาแน่นและมีความเร็วก๊าซและอนุภาคสูง เมื่อพิจารณาการกระจายตัวค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักพบว่า ที่บริเวณกลางท่อ ค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักมีค่าสูงและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่วนที่บริเวณใกล้ผนัง ค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักมีค่าต่ำเนื่องจากมีค่าสัดส่วนอนุภาคสูงที่บริเวณดังกล่าว เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลวนของอนุภาค พบว่า Gs ส่งผลอย่างมากต่อค่าสัดส่วนอนุภาค ดังนั้นการกระจายค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนัก จึงขึ้นกับการกระจายค่าสัดส่วนอนุภาคภายในระบบ แต่เมื่อศึกษาผลของความเร็วก๊าซป้อน พบว่า ความเร็วก๊าซป้อนส่งผลต่อทั้งการ

กระจายค่าสัดส่วนอนุภาคและความเร็วก๊าซภายในระบบ ดังนั้นการกระจายค่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันหนักจึงขึ้นอยู่กับค่าสัดส่วนอนุภาคและความเร็วก๊าซ นอกจากนี้พบว่า ค่าที่ได้จากการจำลองแบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Behjat, Y. et al. 2011. CFD analysis of hydrodynamic, heat transfer and reaction of three phase riser reactor. **Chemical Engineering Research and Design** 89: 978-989.

Chalermsinsuwan, B. et al. 2012. Computational fluid dynamics of circulating fluidized bed downer: Study of modeling parameters and system hydrodynamic characteristics. **Chemical Engineering Journal** 189-190: 314-335

Khanali, M. et al. 2014. Numerical simulation and experimental investigation of plug-flow fluidized bed drying under dynamic conditions. **Journal of Food Engineering** 137: 64-75.

Khongprom, P. et al. 2012. Axial gas and solids mixing in a down flow circulating fluidized bed reactor based on CFD simulation. **Chemical Engineering Science** 73: 8-19

Liu, F. et al. 2006. CFD simulation of fluid catalytic cracking in downer reactors. **China Particuology** 4: 160-166.

Lopes, G.C. et al. 2011. Three-dimensional modeling of fluid catalytic cracking industrial riser flow and reactions. **Computers and Chemical Engineering** 35: 2159-2168.

Mei, Y. et al. 2017. Numerical comparison of two modes of gas- solid riser operation: Fluid catalytic cracking vs CFB combustor. **Particuology** 31: 42-48.

Songip, A.R. et al. 1994. Kinetic studies for catalytic cracking of heavy oil from waste plastic over REY zeolite. **Energy & Fuels** 8: 131-135.

Vaishali, S. et al. 2008. Hydrodynamic simulation of gas-solids downflow reactors. **Chemical Engineering Science** 63: 5107-5119.

Wang, C. et al. 2015. Axial solids flow structure in a high density gas-solids circulating fluidized bed downer. **Power Technology** 272: 153-164.

Wang, C. et al. 2016. Radial solids flow structure in high flux gas-solids circulating fluidized bed reactors. **Power Technology** 301: 848-857.

Wimol-ath, N. 2014. Scale-up of co-current downflow circulating fluidized bed reactors using CFD simulation. **Master Thesis.** Industrial Chemistry, Graduate College, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

การศึกษาความเป็นไปได้การใช้ประโยชน์จากพื้นที่หลังคา/ดาดฟ้าของอาคารปัจจุบัน ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Feasibility Study: Utilization of Roof Area on Existing Buildings, Faculty of Engineering, Kasetsart University

รำพูน สมมโนนัย[1*] และ จีมา ศรลัมพ์[2]

Rumpoon Sommamonai[1*] and Cheema Soralump[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์พื้นที่หลังคา/ดาดฟ้าอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้ทำการศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์ใน 3 รูปแบบ คือ 1. ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร (solar rooftop) เพื่อผลิตไฟฟ้าใช้เอง ทดแทนการซื้อไฟฟ้า 2. การทำสวนหลังคา (green roof) เพื่อเพิ่มพื้นที่สีเขียว รักษาระบบนิเวศน์ภายในมหาวิทยาลัย และ 3. การกักเก็บน้ำฝน (rainwater harvesting) เพื่อทดแทนการใช้น้ำประปา โดยทำการประเมินความเป็นไปได้ในด้าน สังคม สิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ จากแนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development) ผลจากการศึกษาพบว่า 1. ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารจำนวน 6 อาคาร มีกำลังการผลิตรวมเท่ากับ 387 กิโลวัตต์ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 565.02 เมกะวัตต์ต่อปี และสามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจก 328.9 tonCO_2e/ปี 2. อาคาร11 ชำนาญ เพ็ญชาติและอาคาร14 ชูชาติ กำภู เหมาะสำหรับการทำสวนหลังคา และ 3. พื้นที่หลังคาอาคาร14 ชูชาติ กำภู สามารถรวบรวมน้ำฝนได้ประมาณ 12,000 ลิตรต่อวัน และลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ 5940 ลิตรต่อวัน

ABSTRACT

This research was to study the utilization of roof area on building, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 3 types were studied: 1. solar rooftop system to reduce external use of electricity, 2. green roof for KU campus policy, 3. rainwater harvesting as a substitute for tap water. Feasibility study of social, environmental, economic aspects were assessed towards sustainable development. Results show that: 1. solar rooftop systems on the total of 6 buildings, can generate 387 kW or 565.02 MW per year and can reduce CO_2 emission 328.9 ton per year 2. Roof of Building 11 and Building 14 can be modified for green roof and 3. Building 14 is capable of receiving 12,000 liters of rainwater per day and can reduce water for toilet flushing of 5940 liters per day.

Key Words: sustainable environment, solar rooftop, green roof, rainwater harvesting, Kasetsart University

*Corresponding author; e-mail address: rumpoon.s@hotmai.com

[1]บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ.พหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1]The graduate School, Kasetsart University,50 PaholYothin Road, Chatuchak , Bangkok10900

[2]ภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Deparment of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University , Bangkok10900

คำนำ

การเจริญเติบโตของชุมชนเมืองและการก่อสร้างเพื่อรองรับการขยายตัวของประชากร มีผลทำให้พื้นที่สีเขียวลดน้อยลง สิ่งก่อสร้างที่มีมากขึ้น เกิดผลกระทบเชิงลบโดยตรงต่อสภาพแวดล้อม เมื่อจำนวนประชากรเพิ่มขึ้น การบริโภคทรัพยากรมากขึ้น ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มากขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ที่ไปสะสมอยู่ในบรรยากาศ อันเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เป็นสถาบันการศึกษาที่มีการเรียนการสอนในหลากหลายสาขาวิชา ประกอบด้วย 15 คณะและ 1 วิทยาลัย มีพื้นที่ทั้งหมด 846 ไร่ จากข้อมูลสถิติ (กองแผนงาน, 2554) ตั้งแต่ พ.ศ. 2552 ถึง 2556 ระบุว่ามีพื้นที่สิ่งก่อสร้างเพิ่มขึ้นทุกปีเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10.51 ในแต่ละปี ในช่วงปี 2556 ถึง 2257 พบว่าพื้นที่สีเขียวภายในมหาวิทยาลัยลดลงถึงร้อยละ 9

เพื่อพิจารณาพื้นที่ในปัจจุบัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มีพื้นที่รวมประมาณ 45,500 ตารางเมตร ประกอบด้วย สำนักงาน อาคารเรียนและอาคารปฏิบัติการ จำนวน 18 อาคาร บริเวณพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นอาคารเรียน เมื่อเทียบกับพื้นที่สีเขียว ที่มีต้นไม้ยืนต้นปลูกบนดิน ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงตระหนักในการจัดการพื้นที่อาคารที่มีอยู่ในปัจจุบัน (existing buildings) ให้เกิดความยั่งยืนและใช้งานอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ว่างหลังคา/ดาดฟ้าอาคารภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ใน 3 ประเด็น คือ 1. ศึกษาความเป็นไปได้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร (solar rooftop) เพื่อการผลิตไฟฟ้าใช้เองในอาคาร ทดแทนการซื้อไฟฟ้า

2. ศึกษาความเป็นไปได้การทำสวนหลังคา (green roof) เพื่อเพิ่มพื้นที่สีเขียว รักษาระบบนิเวศน์ภายในมหาวิทยาลัย 3. การกักเก็บน้ำฝน (rainwater harvesting) เพื่อใช้เป็น gray water ทดแทนการใช้น้ำประปา (gray water ดังกล่าวคือ ใช้ทดแทนน้ำประปาโดยไม่ผ่านการบำบัดและใช้งานแบบที่ไม่ได้ใช้ในการสัมผัสกับร่างกายโดยตรง)ในบางกิจกรรม โดยใช้แนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development) มาใช้เป็นเกณฑ์การประเมินในงานวิจัย พิจารณาผลประโยชน์ร่วมทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ 1.ด้านเศรษฐกิจ ดูความคุ้มค่าในการลงทุน ผลตอบแทนที่ได้รับ 2. ด้านสิ่งแวดล้อม มุ่งเน้นผลประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและ 3. ด้านสังคม การมีส่วนร่วมภายในมหาวิทยาลัย ดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด

Table 1 Methodology according to sustainability

Sustainable Development	Solar rooftop	Green roof	Rainwater harvesting
Environmental issues	CO_2 Reduction	Plants Benefit	Water Conservation
Economic Analysis	Cost Benefit Analysis		
Social opinion	Questionnaire from different stakeholders		

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยครั้งนี้ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ขั้นตอนโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การคัดกรองพื้นที่หลังคา/ดาดฟ้าอาคาร ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เพื่อนำไปประเมินความเป็นไปได้ในแต่ละรูปแบบ โดยมีเกณฑ์พิจารณาดังนี้

- Solar rooftop : พื้นผิวหลังคาและดาดฟ้าไม่ชำรุด มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พื้นที่ติดตั้งต้องไม่มีสิ่งก่อสร้างหรือร่มเงาจากต้นไม้ใหญ่บดบังการรับแสงอาทิตย์
- Green roof : การรับน้ำหนักของพื้นที่ดาดฟ้าอาคาร (Dead load , Live load) พื้นผิวดาดฟ้า ควรอยู่ในสภาพที่ดี ไม่หลุดลอก เข้าถึงพื้นที่ได้ง่ายและควรมีระบบระบายน้ำที่ดี
- Rainwater harvesting : หลังคา/ดาดฟ้าอาคาร มีสภาพพื้นผิวไม่ชำรุด เข้าถึงพื้นที่ได้ง่าย และมีพื้นที่สำหรับถังเก็บน้ำฝน (ถังเก็บน้ำพิจารณาทั้งพื้นที่บนอาคารหรือบนดิน)

2) การเก็บข้อมูลแบบสอบถาม

สำรวจความคิดเห็นและเก็บข้อมูลประชากรภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ปีการศึกษา 2559 จำนวน 378 คน กำหนดขนาดของประชากรกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้วิธี Taro Yamane (1973) ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% และค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ข้อมูลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ผลที่ได้เป็นส่วนหนึ่งในการประเมินด้านสังคม

3) ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร (Solar Rooftop)

ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อสายส่ง (On-grid system) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Polycrystalline ขนาด1.67 เมตร x 1 เมตร น้ำหนัก 13 กิโลกรัมต่อตารางเมตร กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ต่อแผงและมีพื้นที่ติดตั้งรวมอุปกรณ์ 1.68 ตารางเมตรต่อแผง มีหัวข้อการศึกษาดังต่อไปนี้

1. คำนวณปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ ,คำนวณเงินลงทุน, ระยะเวลาคืนทุน โดยอ้างอิงจาก สมาคมสถาปนิกสยาม ในพระบรมราชูปถัมภ์(2558)
2. คำนวณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ใช้ระเบียบวิธีการคำนวณ อ้างอิงของ United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2016) โดยค่าการชดเชยไฟฟ้า on grid mix ประเทศไทยใช้ 0.5821 tCO_2e/kWh อ้างอิงจาก องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก [องค์การมหาชน](2016)

4) การทำสวนหลังคา (Green Roof)

สวนหลังคาหรือหลังคาเขียว คือการปลูกพืชพรรณบนหลังคาหรือการทำสวนบนดาดฟ้าอาคาร เป็นการเพิ่มพื้นที่สีเขียว ช่วยความร้อนบนหลังคา/ดาดฟ้าอาคาร และมีส่วนช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เป็นการใช้พื้นว่างหลังคา/ดาดฟ้าอาคาร ให้เกิดประโยชน์ โดยรูปแบบและแนวทางในการออกแบบ อ้างอิงจาก (Earth Pledge, 2005; Luckett and K, 2009)

5) การเก็บรวบรวมน้ำฝน (Rainwater Harvesting)

การรวบรวมน้ำฝนจากพื้นที่หลังคาอาคาร เพื่อนำมาใช้ประโยชน์อุปโภคบริโภค สำหรับงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานประเภท gray water โดยไม่ผ่านการบำบัด ระบบ rainwater harvesting ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ อ้างอิงจาก (Novak et al., 2014; NYC Environmental Protection, 2012) มีหัวข้อการศึกษา

คือ เก็บข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของอาคารที่ผ่านการคัดกรอง แล้วคำนวณพื้นที่รับน้ำฝน (catchment area) และ ถังเก็บน้ำ (water storage)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

Table 2 The results of the screening of buildings within the Faculty of Engineering

Solar rooftop	Green roof	Rainwater harvesting
Bldg. 1 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	Bldg. 11 ชำนาญ เพ็ญชาติ	Bldg. 8 ปฏิบัติการและวิจัย
Bldg. 8 ปฏิบัติการและวิจัย	Bldg. 14 ชูชาติ กำภู	Bldg. 9 บุญสม สุวชิรัตน์
Bldg. 9 บุญสม สุวชิรัตน์		Bldg. 14 ชูชาติ กำภู
Bldg. 14 ชูชาติ กำภู		
Bldg. 15 ภาควิชาคอมพิวเตอร์		
Bldg. 17 เรียนนานาชาติ		

Table 3 Questionnaire summary for Existing Building Utilization

	Description	Count	Percent	Description	Count	Percent
Sex				**Use the toilet of the Faculty of Engineering per day**		
	Male	220	58.2	No	1	0.3
	Female	158	41.8	1 time	74	19.6
Occupation				2 time	171	45.2
	Undergraduate	342	90.5	>3 time	132	34.9
	Master student	23	6.1	**Number of flushing (every after using)**		
	Doctoral student	0	0	1	240	63.5
	Lecturer	3	0.8	2	108	28.5
	Personnel officer	10	2.6	3	19	5.0
Building use option				>3	11	2.9
	Solar rooftop	161	42.6	**Uses of rainwater**		
	Green roof	136	36.0	Toilet flushing	175	37.9
	Rainwater harvesting	81	21.4	Floor cleaning	224	48.5
Type of Green roof				(required initial treatment)		
	Usually accessible	306	81.0	Potable uses	63	13.6
	Vegetable garden	43	11.4	(required treatment and disinfection)		
	Often inaccessible	29	7.7			

ผลจากการเก็บข้อมูลแบบสอบถามประชากรภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์

พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เพศชาย จำนวน 220 คน คิดเป็นร้อยละ 58.2 โดยเป็นนิสิตปริญญาตรี จำนวน 342 คน คิดเป็นร้อยละ 90.5 แสดงในตารางที่ 3

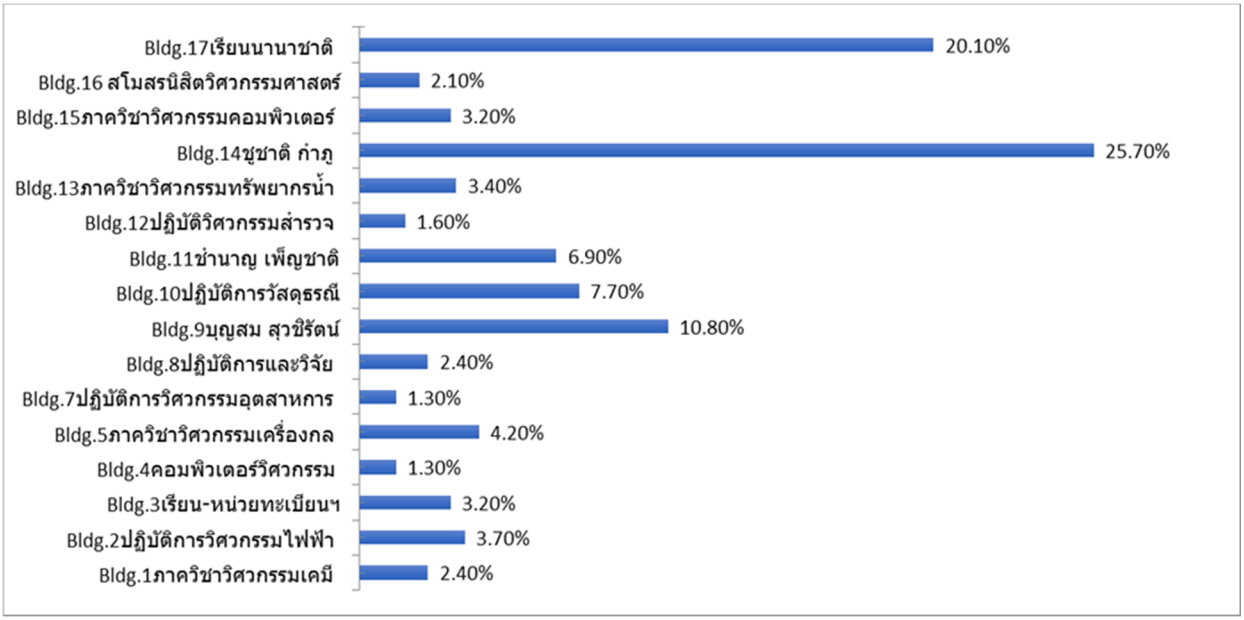


Figure 1 Frequency of toilet use within the Faculty of Engineering

เมื่อเปรียบเทียบความพึงพอใจแนวทางการใช้ประโยชน์พื้นที่หลัง/ดาดฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ พบว่า กลุ่มประชากรมีความต้องการ Solar Rooftop มากที่สุด รองลงมาคือ Green Roof และน้อยที่สุดคือ Rainwater Harvesting คิดเป็นร้อยละ 42.6, 36.0, 21.4 ตามลำดับ และความต้องการรูปแบบสวนบนดาดฟ้า พบว่า เลือกสวนประเภทใช้สอยได้ มีพื้นที่สำหรับพักผ่อน คิดเป็นร้อยละ 81 รองลงมาคือสวนผักสวนครัว 11.4 และสวนสวยงาม 7.7 ตามลำดับ และจากการสำรวจความคิดเห็นเรื่อง รูปแบบการใช้ประโยชน์น้ำฝนประชากรร้อยละ 48.5 เห็นด้วยกับการนำน้ำฝนที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมาใช้ในกิจกรรมทำความสะอาดภายในอาคาร รองลงมาคือ การนำน้ำฝนที่ยังไม่ผ่านการบำบัดมาใช้ในชักโครกภายในอาคาร คิดเป็นร้อยละ 37.9 และเห็นด้วยน้อยที่สุดคือ การนำน้ำฝนที่ผ่านการบำบัดและผ่านการฆ่าเชื้อโรคแล้วนำมาใช้อุปโภคบริโภค คิดเป็นร้อยละ 13.6

กลุ่มประชากรภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ร้อยละ 45.2 มีการเข้าห้องน้ำโดยเฉลี่ย 2 ครั้ง/วัน จำนวนการกดชักโครก 1 ครั้งหลังจากการใช้งาน คิดเป็นร้อยละ 63.5 และจากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่า ห้องน้ำอาคาร 14 ชูชาติ กำภู มีการใช้งานมากที่สุด รองลงมาคือ อาคาร 17 เรียนนานาชาติ และอันดับที่ 3 คืออาคาร 9 บุญสม สุวชิรัตน์ คิดเป็น 25.7 %, 20.10 %, 10.8 % ตามลำดับ

Table 4 Potential output for solar rooftop systems

Building	Number of panel	Installation Area (m^2)	Installed Capacity (kW)	Estimate Electricity Generation per year (kWh/year)
Bldg. 1	566	973.52	141.5	206,590.00
Bldg. 8	280	481.6	70	102,200.00
Bldg. 9	184	316.48	46	67,160.00
Bldg. 14	90	154.8	22.5	32,850.00
Bldg. 15	182	313.04	45.5	66,430.00
Bldg. 17	246	423.12	61.5	89,790.00
Total	1,548	2,662.56	387	565,020.00

ผลการ

ประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Rooftop)

อาคารที่ผ่านการคัดกรอง (Table 2) จำนวน 6 อาคาร สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 565.02 เมกะวัตต์ต่อปี พื้นที่ติดตั้งทั้งหมด 2,662.56 ตารางเมตร มีกำลังการติดตั้งรวมเท่ากับ 387 กิโลวัตต์ (Table 4)

เงินลงทุนในการติดตั้งประมาณ 19,305,000 บาท ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 7.9 ปี โดยคิดจากราคาการติดตั้งต่อวัตต์ 50 บาท (ข้อมูลจากผู้ติดตั้งระบบฯ ณ ปี 2560) และ คิดจากค่าไฟฟ้าคิดที่หน่วยละ 4.3 บาท สามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 328.9 tonCO_2e/ปี

การออกแบบสวนหลังคาอาคาร (Green Roof)

a) b)

Figure 2 Roof Deck on Bldg.11 **a)** existing and **b)** potential extensive roof garden proposed

อาคาร11 ชำนาญ เพ็ญชาติ (Figure 2) มีพื้นที่ว่างบนดาดฟ้าประมาณ 85 ตารางเมตร ออกแบบให้เป็นสวนหลังคาแบบไม่ใช้สอย (Extensive Roof Garden) โดยมุ่งเน้นประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อลดความร้อนบนดาดฟ้าอาคาร เลือกปลูกหญ้าและต้นไม้ล้มลุกคลุมดิน เช่น ต้นหลิว ที่มีความทนทานแดด ดูแลง่าย ทำการติดตั้งแบบ Built in Green Roof มีการทำระบบระบายน้ำด้วยแผ่นตะแกรงระบายน้ำ

a) b)

Figure 3 Roof Deck on Bldg.14 **a)** existing and **b)** potential intensive roof garden proposed

อาคาร14 ชูชาติ กำภู (Figure 3) มีพื้นที่ว่างด้านทิศเหนือและทิศตะวันออกรวมประมาณ 250 ตารางเมตร ออกแบบให้เป็นสวนหลังคาแบบใช้สอยได้ (Intensive Roof Garden) มุ่งเน้นประโยชน์ด้านการใช้งาน มีพื้นที่สำหรับพักผ่อน สวนหย่อมไม้พุ่ม มีโต๊ะม้านั่ง ริมระเบียงไม้ยืนต้นขนาดกลางถึงใหญ่ เช่น ต้นลีลาวดี หมากเหลือง ปาล์มไผ่ โดยปลูกในกระถางสำเร็จรูป สะดวกสำหรับการจัดวางและเคลื่อนย้าย

สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยด้านกายภาพและด้านสิ่งแวดล้อม อาคาร 11 ชำนาญ เพ็ญชาติและอาคาร 14 ชู ชาติ กำภู มีความเป็นไปได้ในการทำสวนหลังคา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับงบประมาณและนโยบายของมหาวิทยาลัย ที่จะช่วยส่งเสริมให้มีความเป็นไปได้ โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือด้านเศรษฐกิจ เนื่องจากประโยชน์ที่ได้จากการทำสวนเป็นประโยชน์ที่ไม่สามารถตีเป็นมูลค่าทางการเงินได้โดยตรง และอาจมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น เช่น การมีสวนพักผ่อนหย่อนใจบนดาดฟ้าอาคาร ทำให้คนใช้ลิฟต์มากขึ้น เพื่อขึ้นไปใช้งาน

การออกแบบ rainwater harvesting

Table 5 The potential of rainwater harvesting from rooftops

Building	Area (m^2)	C	Rainfall[1] (mm/month)	Volume (m^3/month)	Volume (m^3/day)
Bldg. 8	782	0.85	191.769	127.47	4.25
Bldg. 9	1705	0.85	191.769	277.92	9.26
Bldg. 14	2342	0.85	191.769	381.75	12.73

[1]The average annual rainfall from May to October (1985-2004)

เมื่อพิจารณาผลดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า อาคาร 14 ชูชาติ กำภู สามารถกักเก็บน้ำฝนได้มากที่สุด เท่ากับ 12,000 ลิตรต่อวัน ผู้วิจัยจึงเลือกเป็นอาคารกรณีศึกษาการนำน้ำฝนที่รวบรวมได้ (gray water) ใช้ทดแทนน้ำประปาในโถชักโครก (toilet flushing) จากการเก็บข้อมูลพบว่า จำนวนประชากรใช้ห้องน้ำเท่ากับ 330 คนต่อวัน, อัตราการใช้น้ำเฉลี่ยเท่ากับ 18 ลิตรต่อคนต่อวัน , อัตราการใช้ห้องน้ำต่อวันเท่ากับ 2 ครั้งต่อคน และโถชักโครก (flush tank) จำนวน 93 โถ ความจุ 9 ลิตร

สรุปได้ว่า เมื่อนำน้ำฝนมาใช้ทดแทนน้ำประปา (toilet flushing) สามารถลดปริมาณการใช้น้ำสูงสุดได้เท่ากับ 5940 ลิตรต่อวัน คิดเป็นจำนวนเงินเท่ากับ 3058 บาทต่อเดือน (ค่าน้ำ17.16 บาท/ลบ.ม.)และยังเหลือน้ำฝนสำรองเท่ากับ 6060 ลิตรต่อวัน ค่าใช้จ่ายในการทำระบบ rainwater harvesting ประมาณ 598,000 บาท โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

-ถังเก็บน้ำใต้ดิน 5,000 ลิตร จำนวน 2 ถัง	68,000	บาท
-ค่าขุดดินหลุมฐานและถมคืน กว้าง 4 ม.ยาว 4 ม.สูง 2.5 ม.	30,000	บาท
-ค่าใช้จ่ายส่วนอื่นๆ (เช่น ค่าแรง, ค่าวางระบบท่อน้ำ)	500,000	บาท

สรุป

การศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์พื้นที่หลังคา/ดาดฟ้าอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ใน 3 รูปแบบ สามารถสรุปได้ว่า 1.อาคารจำนวน 6 อาคาร มีความเป็นไปได้ในการติดตั้ง Solar Rooftop สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 565.02 เมกะวัตต์ต่อปี 2. อาคาร11 ชำนาญ เพ็ญชาติ และอาคาร14 ชูชาติ กำภู มีความเป็นไปได้ในการทำ Extensive Roof Garden ,Intensive Roof Garden ตามลำดับ 3. อาคาร14 ชูชาติ กำภู มีความเป็นไปได้ในการทำระบบ rainwater harvesting สามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ 5940 ลิตรต่อวัน

เอกสารอ้างอิง

พาสินี สุนากร และ ทิพาพรรณ ศิริเวชฎารักษ์. 2559. **Vertical and Roof Garden จัดสวนสวยบนผนังและหลังคา**. บ้านและสวน, สนพ.

พาสินี สุนากร และ ม.ล.วุฒิพงษ์ ทวีวงศ์. 2559. **คู่มือเกษตรบนอาคาร**. สำนักงานกองทุนเสริมสร้างสุขภาพ, กรุงเทพฯ

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2016. **ACM0002 Grid-connected electricity generation from renewable sources version 17.0.** Available Source: http://www.sprsolarroof.co.th/th/quality

Novak, C. A., G. E.V. Giesen and K.M.DeBusk, 2014. **Designing rainwater harvesting systems: integrating rainwater into building systems**, Wiley, NJ, USA.

USMM 2000, **Urban Stormwater Management Manual for Malaysia**, Department of Irrigation and Drainage, Malaysia.

Shaaban, A. J.S., Kardi, J. and Awang, 2002. **Rainwater harvesting and utilization for a double storey terrace house at Taman Wangsa Melawi**. KL, Construction Industry Development Board, Malaysia.

Earth Pledge. 2005. **Green Roofs Ecological Design and Construction**. Schiffer Books, PA, USA.

Lau, T.L., et al. 2005. **Study on High Rise Building Incorporated with Rainwater Harvesting Storage Tank towards Building a Sustainable Urban Environment in Malaysia**. SB05, Tokyo.

Letcher and T.M. 2008. **Future Energy Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet**. Elsevier, the Netherlands.

Luckett and K. 2009. **Green Roof Construction and Maintenance**. McGraw Hill, USA.

Hao, X., V. Novotny, and V. Nelson, 2010, **Water Infrastructure for Sustainable Communities**, IWA publishing, UK.

NYC Environmental Protection. 2012. **Guideline for the Design and Construction of Storm water Management Systems.**

Roehr, D. and E. Fassman-Beck. 2015. **Living Roofs in Integrated Urban Water Systems**. Routledge NY, USA.

การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้หลาวชะโอน

Study of the Influence of Cutting Parameters on Surface Roughness in Turning of Oncosperma Tigillarium Wood

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์[1*] จักรนรินทร์ ฉัตรทอง[1] จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล[1] และ วรรธนพร ชีววุฒิพงศ์[1]

Surasit Rawangwong[1*], Jaknarin Chattong[1], Julaluk Rodjananugoon[1] and Watthanaphon Cheewawuttipong[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้หลาวชะโอน โดยใช้มีดกลึงคาร์ไบด์ ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด การทดลองครั้งนี้ใช้ไม้หลาวชะโอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร โดยกำหนดขอบเขตการทดลองให้มีความเร็วรอบ 540-1,200 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.12-0.5 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.5-1.0 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อใช้อัตราป้อนและความลึกในการตัดต่ำลง เพิ่มความเร็วรอบให้สูงขึ้น จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่วัดจริงโดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5% ผลการทดลองหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของสมการความขรุขระผิวเท่ากับ 4.28% ซึ่งน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ABSTRACT

This research aims to study the influence of factors affecting surface roughness in turning oncosperma tigillarium wood with carbide cutting tool. Factors used in the experiment are variable of speed, feed rate and depth of cut, using oncosperma tigillarium wood diameter 25 mm, Scoping study to speed 540-1200 rpm and feed rate from 0.12-0.5 mm /rev and 0.5-1 mm in depth of cut. From the experiment, factors affecting the surface roughness is speed, feed rate and depth of cut. The surface roughness trended to decrease when the feed rate and depth of cut were decreased. The increasing the speed up. From experiments to confirm the results compare to the association with actual measured values by assigning the value of weather forecast for surface roughness value does not exceed 5% of the experimental results, find the mean absolute percentage error of surface equal to 4.28% which is less than the tolerance specified, and the value is in the acceptable.

Keyword: Turning, Oncosperma tigillarium wood, Surface roughness, Design of experiment

*Corresponding author; e-mail address: sitnong2@yahoo.co.th

[1]หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ

[1]Materials Processing Technology Research Unit

[1]สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา 90000

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, 90000

คำนำ

อุตสาหกรรมไม้ในประเทศไทยมีการส่งออกผลิตภัณฑ์ไม้และเครื่องเรือนในปี 2558 มีมูลค่ารวมประมาณ 3,034.53 ล้านเหรียญสหรัฐฯ การส่งออกผลิตภัณฑ์ไม้และเครื่องเรือน แบ่งเป็น 3 กลุ่มประเภทสินค้าดังนี้ กลุ่มเครื่องเรือนและชิ้นส่วน ประกอบด้วย เครื่องเรือนไม้ เครื่องเรือนอื่นๆ และชิ้นส่วนเครื่องเรือน การส่งออกเครื่องเรือนและชิ้นส่วนมีมูลค่าคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 27.69 ของมูลค่าส่งออกรวมผลิตภัณฑ์ไม้และเครื่องเรือนทั้งหมด ซึ่งการส่งออกเครื่องเรือนและชิ้นส่วน มีมูลค่ารวมประมาณ 840.27 ล้านเหรียญสหรัฐ กลุ่มผลิตภัณฑ์ไม้ประกอบด้วย เครื่องใช้ทำด้วยไม้ อุปกรณ์ก่อสร้างไม้ กรอบรูปไม้ และรูปแกะสลักไม้ การส่งออกผลิตภัณฑ์ไม้มีมูลค่าคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 6.03 ของมูลค่าส่งออกรวมผลิตภัณฑ์ไม้และเครื่องเรือนทั้งหมด ซึ่งการส่งออกผลิตภัณฑ์ไม้มีมูลค่ารวมประมาณ 183.00 ล้านเหรียญสหรัฐฯ กลุ่มไม้และผลิตภัณฑ์ไม้แผ่น ประกอบด้วย ไม้แปรรูป แผ่นไม้วีเนียร์ ไม้อัด ไฟเบอร์บอร์ด (Fiber Board) และไม้และผลิตภัณฑ์ไม้อื่น การส่งออกไม้และผลิตภัณฑ์ไม้แผ่น มีมูลค่าคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 66.28 ของมูลค่าส่งออกรวมผลิตภัณฑ์ไม้และเครื่องเรือนทั้งหมด ผลิตภัณฑ์ไม้แผ่นมีมูลค่ารวมประมาณ 2,011.26 ล้านเหรียญสหรัฐ นอกจากส่งออกแล้ว ประเทศไทยยังมีการนำเข้าไม้และเครื่องเรือน ส่วนใหญ่เป็นการนำเข้าวัตถุดิบไม้ ได้แก่ ไม้แปรรูปไม้อัดและไม้วีเนียร์ และไม้ซุง เพื่อมาผลิตเป็นสินค้าต่อเนื่องในอุตสาหกรรมเครื่องเรือน โดยไม้แปรรูป การนำเข้าไม้และเครื่องเรือนมีมูลค่ารวมประมาณ 521.15 ล้านเหรียญสหรัฐฯ (การปลูกสวนป่าภาคเอกชน, 2559) โดยไม้ที่นำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในประเทศไทย ได้แก่ ไม้ยางพารา ไม้ยูคาลิปตัส ไม้สัก ไม้ขนุน และไม้หลาวชะโอน เป็นต้น

หลาวชะโอน หรือ นิบง เป็นพรรณไม้ชนิดหนึ่งในวงศ์ปาล์ม โดยทั่วไป เมื่อพูดถึงหลาวชะโอน จะหมายถึง หลาวชะโอนทุ่ง ส่วนอีกชนิดพันธุ์จะเรียกว่า หลาวชะโอนเขา ชื่อหลาวชะโอน เป็นชื่อเรียกในภาษาไทยกลาง ขณะที่ไทยถิ่นใต้มักจะย่อเหลือ หลาโอน และในภาษามลายู เรียกว่า นิบง ไม้หลาวชะโอนซึ่งมีอยู่มากในภาคใต้ ลักษณะคล้ายไม้ตาล สามารถนำมาแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์หรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ หลาวชะโอนทุ่ง เป็นปาล์มขนาดใหญ่ แตกกอ เส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นประมาณ 10-15 เซนติเมตร สูงได้ถึง 25 เมตร ทางใบยาว 3.5-4 เมตร ขนาดของกอมักจะใหญ่กว่าหลาวชะโอนเขา มีหนามสีดำปกคลุมทั่ว ลำต้น กาบใบ ก้านใบ และก้านช่อดอก ใบประกอบแบบขนนก ทางใบและใบย่อยอ่อนลู่ลง คอยอดสีเขียวเข้มเด่นชัดใบย่อยรูปร่างน้ำคว่ำ เรียงตัวสม่ำเสมอ ใบย่อยขนาด 60 x 3 เซนติเมตร ช่อดอกเป็นช่อแยกแหนง 2 ชั้น ออกใต้คอยอดดอกแยกเพศอยู่ในช่อเดียวกัน ก้านแขนงช่อห้อยลง และมีจำนวนมากกว่าหลาวชะโอนเขาออก ดอกประมาณเดือนกรกฎาคม ถึง กุมภาพันธ์ ผลกลม ขนาด 0.7-1 เซนติเมตร ผลอ่อนสีเขียว ผลสุกสีม่วง มี 1 เมล็ดต่อผลติดเรียงเวียนรอบก้านช่อ (ไม้หลาวชะโอน, 2559)

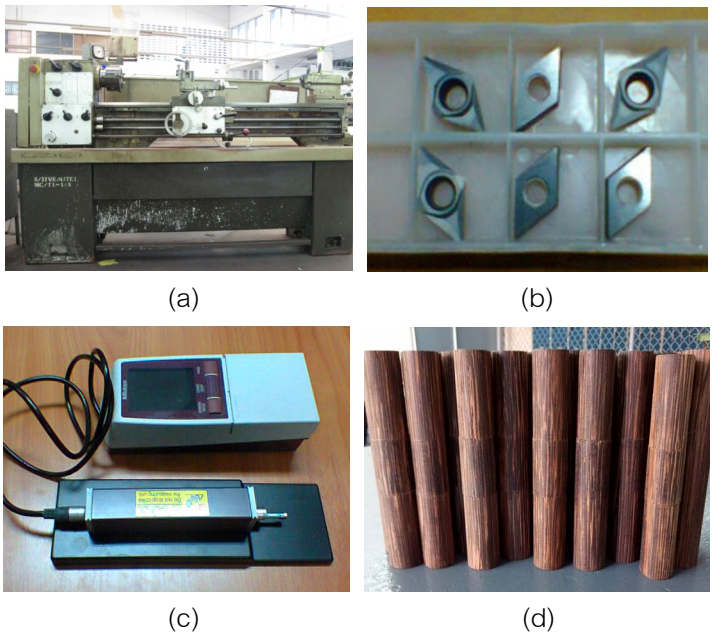
หลาวชะโอน พบได้ตามที่ลุ่มใกล้ชายฝั่ง ที่เป็นดินทราย มีการระบายน้ำดี และกระจัดกระจายในป่าพรุ หรือตามหุบเขา ลำต้นของหลาวชะโอนปัจจุบันนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในการทำเสาค้ำยัน เนื้อไม้แปรรูปแล้วสามารถนำไปประดับตกแต่ง การใช้ประโยชน์เนื้อไม้ใช้ก่อสร้างได้ มีความแข็งแรงทนทาน และเนื้อไม้เมื่อแปรรูปแล้วลายของเนื้อไม้จะมีความสวยงามสามารถนำไปเป็นส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน เครื่องประดับได้เช่นกัน (ไม้หลาวชะโอน, 2559)

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความขรุขระผิวของไม้ต่างๆ มีดังนี้ สุรสิทธิ์ และจักรนรินทร์ (2551) ได้ศึกษาอิทธิพลตัวแปรที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้ตาลโตนดด้วยมีดคาร์ไบด์ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวคือ อัตราป้อน และความเร็วตัด ซึ่งมีแนวโน้มว่าค่าความขรุขระผิวจะลดลงเมื่อใช้อัตราป้อนต่ำลงและใช้ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น หลังจากนี้ สุรสิทธิ์ และคณะ (2555) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงไม้ยางพาราอัดแท่งด้วยมีดคาร์ไบด์ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวคือ อัตราป้อน และความเร็วตัด ซึ่งมีแนวโน้มว่าค่าความขรุขระผิวลดลง เมื่อใช้อัตราป้อนต่ำลง และใช้ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ส่วนความลึกในการตัดไม่มีผลความขรุขระผิว ต่อมา Surasit *et al.* (2013) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงไม้ปาล์มน้ำมันด้วยมีดคาร์ไบด์ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลความขรุขระผิว คือ อัตราป้อน และความเร็วตัด มีแนวโน้มว่าค่าความขรุขระผิวจะลดลง เมื่อใช้อัตราป้อนต่ำลง และใช้ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ส่วนความลึกในการตัดไม่มีผลความขรุขระผิว หลังจากนั้น สุรสิทธิ์ และคณะ (2558) ได้ศึกษาอิทธิพลตัวแปรหลักที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้มะพร้าวด้วยมีดคาร์ไบด์ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลความขรุขระผิว คือ อัตราป้อนและความเร็วตัด ซึ่งมีแนวโน้มว่าค่าความขรุขระผิวลดลง เมื่อใช้อัตราป้อนต่ำลง แต่ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมของการกลึงไม้หลาวชะโอน เพื่อเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมการผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้หลาวชะโอนในแง่ของการเลือกใช้สภาวะในการกลึงตัดที่เหมาะสม เพื่อเป็นประโยชน์ในการประหยัดเวลาในการปรับแต่งชิ้นงานต้นทุนการผลิต และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมากขึ้นนอกจากนี้ก็เพื่อจะเป็นแนวทางสู่งานวิจัยที่ละเอียดและกว้างขวางยิ่งขึ้นต่อไป

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย เครื่องกลึง ยี่ห้อ Harrison รุ่น M 300 ความเร็วรอบสูงสุด 2,500 รอบต่อนาที อัตราป้อนสูงสุด 1 มิลลิเมตรต่อรอบ ผลิตในประเทศอังกฤษ แสดงดัง Figure 1 (a) เครื่องมือตัดใช้เม็ดมีดคาร์ไบด์ ยี่ห้อ Plansee Tizit (CERA TIZIT) ชนิด DCGT 11T308FN-27 เกรด H10T มีส่วนผสมของ Co 6.0% ข้อมูลทางเทคนิคมีความเร็วตัดอยู่ในช่วง 80-180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนอยู่ในช่วง 0.1-0.75 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัดอยู่ในช่วง 1-10 มิลลิเมตร แสดงดัง Figure 1 (b) ใช้เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อมิตูโตโย รุ่น SJ-210 ผลิตในประเทศญี่ปุ่น แสดงดัง Figure 1 (c) และวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นไม้หลาวชะโอน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร แสดงดัง Figure 1 (d)



(a) (b)

(c) (d)

Figure 1 Equipment and tools.

วิธีดำเนินการ

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการกลึงปอกของไม้หลาวชะโอนโดยการออกแบบการทดลอง ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยมีตัวแปรตอบสนองคือ ค่าความขรุขระผิว ซึ่งจะวัดผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ผ่านการกลึงปอกโดยการวัดค่าความขรุขระผิว 3 ตำแหน่ง ห่างกัน 120 องศา การวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) หาขนาดสิ่งตัวอย่างการทดลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระดับนัยสำคัญ 5% โดยใช้โปรแกรม Minitab 16

2) ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวภายใต้ข้อสมมุติฐานว่าปัจจัยหลัก ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด รวมถึงอันตรกิริยา (Interaction) ที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวภายใต้การทดลองแบบทั่วไปหลายระดับ (General Factorial Design) (ปราเมศ, 2545; ประไพศรี และคณะ, 2551; Montgomery, 2012) โดยปัจจัยหลักในการทดลองในขั้นตอนนี้มี 3 ระดับ แสดงดัง Table 1

Table 1 Defined factors for experiments

Factor	Low	Medium	High
Speed (rpm)	540	800	1,200
Feed Rate (mm/rev)	0.12	0.30	0.50
Depth of Cut (mm)	0.5	0.8	1.0

3) วิเคราะห์การทดลองโดยใช้ค่าสถิติ P-value ที่ระดับนัยสำคัญ 5% ในการวิเคราะห์ความผันแปรเพื่อทดสอบสมมุติฐานข้างต้นของการทดลอง และแสดงผลของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวของการกลึงปอกไม้หลาวชะโอนในรูปตัวแบบสมการถดถอยเชิงเส้นอันดับที่1 (1st Order Linear Regression Model)

4) ตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบสมการถดถอยเชิงเส้นอันดับที่ 1 และเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการพยากรณ์และผลจากการวัดค่าจริงโดยค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ที่ได้ต้องไม่เกินค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนด 5%

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ขนาดตัวอย่างในแต่ละการทดลอง

จากการทดลองกลึงปอกไม้หลาวชะโอน โดยกลึงปอกที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.30 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร ทำการทดลองซ้ำ 12 ครั้ง แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อหาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 พบว่าได้ขนาดสิ่งตัวอย่าง เท่ากับ 4 ตัวอย่าง ในสภาวะการทดลองให้ค่ากำลังแห่งการทดสอบ เท่ากับ 98.81% ซึ่งสูงกว่าค่าระดับความเชื่อมั่นที่ตั้งไว้ 95% ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงทดลองซ้ำ 4 ครั้ง

2. ผลและการวิเคราะห์การทดลองเพื่อปรับตัวแปรช่วงสภาวะการกลึงเพื่อหาค่าความขรุขระผิวโดยการออกแบบการทดลองแบบทั่วไปหลายระดับ

ในการศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวในการทดลองแบบ General Factorial Design เพื่อลดความผันแปรที่เกิดจากการวัด ผู้วิจัยได้กำหนดการบันทึกผลทดลองโดยการทดลอง 4 ซ้ำ ค่าที่ได้จะมาจากค่าเฉลี่ยของการวัดซ้ำ 3 ครั้ง การทดลองในขั้นตอนนี้จำนวนการทดลองทั้งหมด 108 การทดลอง โดยทำการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 16 ผลการทดลอง พบว่า ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว โดยพิจารณาจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงดัง Table 2, Figure 2, Figure 3 เมื่อพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างสามปัจจัย พบว่าเส้นอันตรกิริยาไม่ตัดกัน ซึ่งยังไม่สามารถสรุปได้ว่าอันตรกิริยาไม่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว เนื่องจากถ้าอันตรกิริยาไม่มีผลเส้นทั้งสองเส้นจะขนานกัน แต่จากกราฟพบว่าเส้นไม่ขนานกัน แสดงว่าอาจจะมีแนวโน้มที่จะตัดกันที่จุดใดจุดหนึ่ง และในการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากการทดลองวัดค่าความขรุขระผิวตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ผลว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 98.94% และค่า Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 98.59% ซึ่งมีความหมายว่าถ้าหากความแปรปรวนในข้อมูลมี 100 ไมโครเมตร แล้วความผันแปร 98.94 ไมโครเมตร สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย ส่วนปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจะได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลวัดค่าความขรุขระผิว สามารถอธิบายได้ด้วยปัจจัยความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด แสดงว่าการออกแบบการทดลองนี้ถูกต้องและมีความเหมาะสม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงปอกไม้หลาวชะโอน คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด และอันตรกิริยาของปัจจัยร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย และจากผลกระทบของปัจจัยหลักมีแนวโน้มว่าเมื่อใช้ค่าความเร็วรอบมาก ค่าความลึกในการตัดน้อย และค่าอัตราป้อนน้อย จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าต่ำ แสดงดัง Figure 2

Table 2 Analysis of variance of surface roughness value and result of regression analysis.

Analysis of Variance for Ra using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Speed	2	8.5957	8.5957	4.2979	708.49	0.000*
Feed Rate	2	33.3920	33.3920	16.6960	2752.30	0.000*
Depth of Cut	2	0.6431	0.6431	0.3215	53.01	0.000*
Speed × Feed Rate	4	2.5784	2.5784	0.6446	106.26	0.000*
Speed × Depth of Cut	4	0.0751	0.0751	0.0188	3.10	0.020*
Feed Rate × Depth of Cut	4	0.1741	0.1741	0.0435	7.17	0.000*
Speed × Feed Rate × Depth of Cut	8	0.2311	0.2311	0.0289	4.76	0.000*
Error	81	0.4914	0.4914	0.0061		
Total	107	46.1808				
S = 0.0778858 R-Sq = 98.94% R-Sq(adj) = 98.59%						

**P*-value less than 0.05 is considered significant.

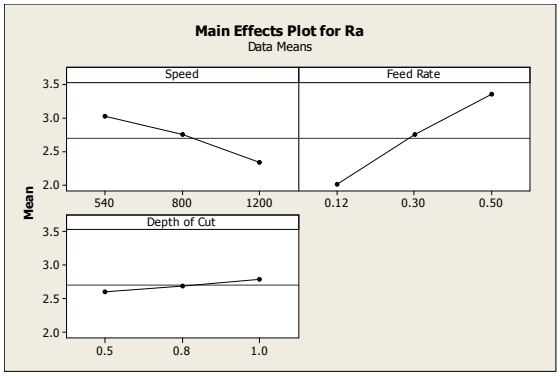


Figure 2 The plot of main effects on surface roughness by changing the level of the main factors.

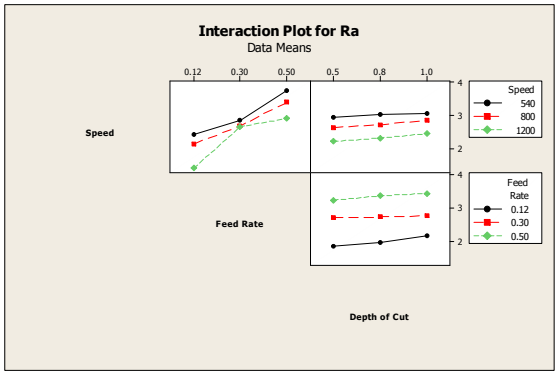


Figure 3 The plot of interaction effects on surface roughness by changing the level of the main factors.

3. การวิเคราะห์ตัวแบบสมการถดถอย (Regression)

การวิเคราะห์การถดถอยของความขรุขระผิวของปัจจัยหลักที่มีผลต่อความขรุขระผิว โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยนำมาวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 ผลจากการวิเคราะห์การถดถอยสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาของปัจจัยร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย ในรูปของสมการเชิงเส้นของค่าความขรุขระผิวในการกลึงไม้หลาวชะโอน โดยสามารถแสดงสมการถดถอย ได้ดังสมการที่ 1 คือ

$$R_a = 3.15814 - (0.00227321\ Speed) + (1.16057\ Feed\ Rate) - (0.657522\ Depth\ of\ Cut) + (0.00316832\ Speed \times Feed\ Rate) + (0.00134422\ Speed \times Depth\ of\ Cut) + (2.40972\ Feed\ Rate \times Depth\ of\ Cut) - (0.00326725\ Speed \times Feed\ Rate \times Depth\ of\ Cut) \quad (1)$$

4. การทดสอบยืนยันผลการทดลอง

การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง เป็นการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง โดยนำสมการถดถอยมาพยากรณ์ความขรุขระผิว โดยทำการสุ่มสภาวะการกลึงอยู่ในขอบเขตที่กำหนด แล้วนำผลที่ได้จากการพยากรณ์มาเปรียบเทียบค่าจริงที่ได้จากการทดลอง โดยกำหนดสภาวะในการทดลองจำนวน 12 สภาวะ ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองพบว่า ผลจากการทดลองหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ของสมการความขรุขระผิวเท่ากับ 4.28 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการกลึงปอกต่อความขรุขระผิวของไม้หลาวชะโอน โดยใช้เครื่องกลึง ยี่ห้อ Harrison รุ่น M 300 วัสดุคมตัดเป็นเม็ดมีดคาร์ไบด์ ยี่ห้อ Plansee Tizit (CERA TIZIT) ชนิด DCGT 11T308FN-27 เกรด H10T ปัจจัยในการกลึงปอกประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยกำหนดความเร็วตัดอยู่ในช่วง 540-1,200 รอบ/นาที อัตราป้อน อยู่ในช่วง 0.12-0.50 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการตัด อยู่ในช่วง 0.5-1.0 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงปอกไม้หลาวชะโอน คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยมีแนวโน้มว่าการเพิ่มความเร็วรอบสูงขึ้น อัตราป้อนต่ำลง และความลึกในการตัดต่ำลง มีผลทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายธวัชชัย กีละ และนายบุญทนา ประจวบแท่น ที่ช่วยในการดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลวิจัย ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

การปลูกสวนป่าภาคเอกชน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : www.forest.go.th/private/index.php. (วันที่ค้นข้อมูล: 12 มีนาคม 2559).

ไม้หลาวชะโอน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : https://th.wikipedia.org/wiki/หลาวชะโอนทุ่ง. (วันที่ค้นข้อมูล: 12 มีนาคม 2559).

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และจักรนรินทร์ ฉัตรทอง. 2551. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงไม้ตาลโตนดด้วยใบมีดคาร์ไบด์. **การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ**. สงขลา. 20-22 ตุลาคม, หน้า 789-795.

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ วรพงค์ บุญช่วยแทน จักรนรินทร์ ฉัตรทอง และมนัส อนุศิริ. 2555. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงไม้ยางพาราด้วยใบมีดคาร์ไบด์โดยใช้การออกแบบการทดลอง. **การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ**. กรุงเทพฯ: 6-7 กันยายน, หน้า 312-318.

Surasit Rawangwong Jaknarin Chatthong and Worapong Boonchouytan. 2013. The Influence of Cutting Parameters of Turning Process on the Oil Palm Wood Using Carbide Tool. **Applied Mechanics and Materials,** 415: pp. 666-671.

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล จักรนรินทร์ ฉัตรทอง ชาตรี หอมเขียว และวรรธนพร ชีววุฒิพงศ์. 2558. อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความขรุขระผิวและการสึกหรอของเม็ดมีดในการกลึงไม้มะพร้าวสำหรับทำชิ้นส่วนเฟอร์นิเจอร์. **การประชุมวิชาการครั้งที่ 53 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**, กรุงเทพฯ,3-6 กุมภาพันธ์, หน้า 728-736.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**. ท้อป. กรุงเทพฯ.

ปราเมศ ชุติมา. 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

Montgomery, D.C. 2012. **Design and Analysis of Experiments**. 8th edition. John Wiley & Sons. New York.

การศึกษากำลังตามแนวแกนของเสาท่อเหล็กประกอบ 3 ท่อ โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

The study of Axial Strength of The Built-up 3 Tube Columns Using Finite Element Analysis

ณัฐกิตติ์ ดำรงอุตสาหกิจ[1*] และ กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ[1]

Nuttakit Damrongutsahakit[1*] and Kitjapat Phuvoravan[1]

บทคัดย่อ

การศึกษากำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาท่อเหล็กกลมประกอบ 3 ท่อที่มีตัวค้ำยันและไม่มีตัวค้ำยัน โดยใช้เสาท่อเหล็กกลม.3-Ø114.3x3.2 มิลลิเมตร และมีความยาวเสา 9000 มิลลิเมตร โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมแอนซิส และขึ้นโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรม Solidworks พบว่ากำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาท่อเหล็กกลมประกอบ 3 ท่อที่มีชิ้นส่วนเสาตรงทั้งหมด 3 ท่อที่ไม่มีตัวค้ำยันสามารถรับแรงตามแนวแกนได้ดีที่สุดเนื่องจากจุดต่อระหว่างท่อและแผ่นเหล็กมีพฤติกรรมเสมือนกึ่งยึดแน่นและท่อที่ใช้เป็นท่อตรงทั้งหมดทำให้โมเมนต์ภายในชิ้นส่วนน้อยที่สุด กำลังที่ได้คิดเป็น 287% ของ 3-ท่อเดี่ยว ในกรณีเป็นเสาประกอบที่มีชิ้นส่วนดัดโค้งทั้งหมด 3 ท่อนั้นให้กำลังให้กำลังที่น้อยที่สุดเนื่องจากเกิดโมเมนต์ภายในสูง ในขณะที่เสาประกอบท่อเหล็กที่มีชิ้นส่วนดัดโค้ง 1 ท่อและตรง 2 ท่อที่ไม่มีตัวค้ำยันมีกำลังรับแรงตามแนวแกนมีกำลังคิดเป็น 121% ของ 3-ท่อเดี่ยว ในกรณีที่มีตัวค้ำยันแนวนอนขนาด Ø42.7x2.3 จะทำให้กำลังเพิ่มขึ้น ซึ่งคิดเป็น 325 % ของ 3-ท่อเดี่ยว หรือเพิ่มขึ้น 204% จากที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้าง

ABSTRACT

This research is aiming to study axial strength of built-up 3 tube columns with and without bracing, 3-Ø114.3x3.2 for main members and length of 9000 mm, using finite element analysis by ANSYS and 3D modeling by Solidworks. For the analysis of axial strength of built-up 3 tube columns, with all straight tubes for main member, without bracing give the best results with resisting axial load, because of the behavior of joint connection between tube and plate is semi-fixed support and all main members are straight tube that caused the internal moment occurs very less. When compares to 3-tube, the result shows that axial strength is approximately 287% of 3-tube strength. For the analysis of built-up tube columns, 3 curved tubes for main member, without bracing. The strength is lowest because of high internal moment occurs. For the analysis of built-up 3 tube columns, with 1 curved tube and 2 straight tube, without bracing. The result shows that axial strength is approximately 121% of 3-tube strength. When included with bracing sizes of Ø42.7x2.3, axial strength is approximately 325% of 3-tube strength or increases 204% of model without bracing.

Key Words: axial strength, built-up column, tube, circular hollow section, finite element, column

*Corresponding author; e-mail address: **Beat_zz@hotmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

บทนำ

ตั้งแต่ในอดีตวัสดุท่อเหล็กกลมได้ถูกนำมาใช้ในโครงสร้างเสาจำนวนมาก เนื่องจากสามารถต้านทานแรงบิดได้สูงและมีรัศมีไจเรชั่นที่เท่ากันทุกด้าน เมื่อต้องการออกแบบเสาที่มีความยาวมากๆโดยที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้างเลย เสาจะมีความชะลูดสูงและเกิดการวิบัติแบบการโก่งเดาะด้านข้าง ซึ่งทำให้กำลังรับแรงตามแนวแกนของเสานั้นลดลงเป็นอย่างมาก วิศวกรจึงต้องหาวิธีเพิ่มกำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาและลดปัญหาที่เกิดจากการโก่งเดาะในกรณีต่าง ซึ่งสามารถกระทำได้หลายวิธีเช่น เปลี่ยนให้เสามีขนาดใหญ่ขึ้น นำวัสดุต่างๆมาเสริมกำลังให้กับเสา การนำตัวค้ำยันมาใส่ หรือนำชิ้นส่วนหลายๆชิ้นมาประกอบกันเป็นเสาเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงตามแนวแกนและลดปัญหาการโก่งเดาะด้านข้าง และอื่นๆ ซึ่งการออกแบบในแต่ละกรณีนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความต้องการในการใช้งานของเจ้าของโครงการด้วยเช่นกัน การนำเสาประกอบมาใช้ในอาคารนั้นมีข้อดีหลายๆด้านเช่น ความสวยงาม เหล็กที่นำมาประกอบมีขนาดหน้าตัดที่เล็กกว่า ไม่จำเป็นต้องมีคานมาช่วยค้ำยันการโก่งเดาะด้านข้าง ซึ่งเสาประกอบประเภทนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลกทั้งภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งในประเทศไทยนั้นก็มีการนำเสาเหล็กประกอบ 2-4 เสามาใช้ในงานโครงสร้างหลายประเภทด้วยเช่นกัน แต่ยังไม่มีงานวิจัยการวิเคราะห์หากำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาท่อเหล็กประกอบ 3 ท่อด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากความหนาของเสาท่อเหล็กกลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยมากๆ จึงได้นำมาตรฐานการออกแบบเหล็ก AISI และ ASD/LRFD มาอ้างอิงเพื่อใช้เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาท่อเหล็กกลม 1 ท่อจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วงอินอิลาสติก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติ กำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาท่อเหล็กกลมประกอบ และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกำลังตามแนวแกนของเสาโดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งลักษณะของเสาท่อเหล็กประกอบ 3 ท่อในงานวิจัยนี้จะมี 3 รูปแบบ คือ 1.เสาท่อเหล็กประกอบที่มีชิ้นส่วนเสาตรง 3 ท่อ 2.เสาท่อเหล็กประกอบที่มีชิ้นส่วนเสาตรง 2 ท่อและดัดโค้ง 1 ท่อ 3.เสาท่อเหล็กประกอบที่มีชิ้นส่วนเสาดัดโค้ง 3 ท่อที่ไม่มีตัวค้ำยันด้านข้างและมีตัวค้ำยันด้านข้าง โดยลักษณะของฐานรองรับเป็นแบบจุดหมุนที่ยอมให้มีการเคลื่อนตัวตามแนวแกนได้ โดยขนาดหน้าตัดท่อเหล็กกลมในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS-3444 ที่มีหน่วยแรงครากเท่ากับ 235 เมกะปาสคาล ซึ่งวิธีการวิเคราะห์นั้นจะทำการสร้างโมเดลสามมิติจากโปรแกรม Solidworks ก่อนบันทึกข้อมูลเป็นนามสกุล .sat และนำโมเดลมาวิเคราะห์ในโปรแกรมแอนซิส ANSYS ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

การศึกษาหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมของเสาท่อเหล็กกลมนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเอลิเมนต์ที่มีขนาดไม่เล็กจนเกินไปแต่ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะช่วยให้การทำงานวิจัยเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการศึกษาหาขนาดเอลิเมนต์นั้นจะใช้การวิเคราะห์ในช่วงอิลาสติกเท่านั้น ตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์ของวัสดุในแสดงไว้ดังรูปภาพที่ 1

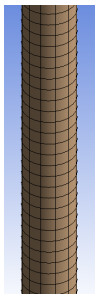


Figure 1 Mesh element

ขนาดของท่อที่นำมาใช้ศึกษาคือ Ø114.3x3.2 มิลลิเมตร และมีความยาวเสา 9000 มิลลิเมตร โดยการวิเคราะห์นั้นจะแบ่งออกเป็น 5 โมเดล และมีขนาดเอลิเมนต์ 50, 40, 30, 20 และ 10 มิลลิเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์หากำลังรับแรงตามแนวแกนของแต่ละโมเดล เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิธีเชิงเส้นแสดงผลแบบกราฟได้ดังรูปภาพที่ 2

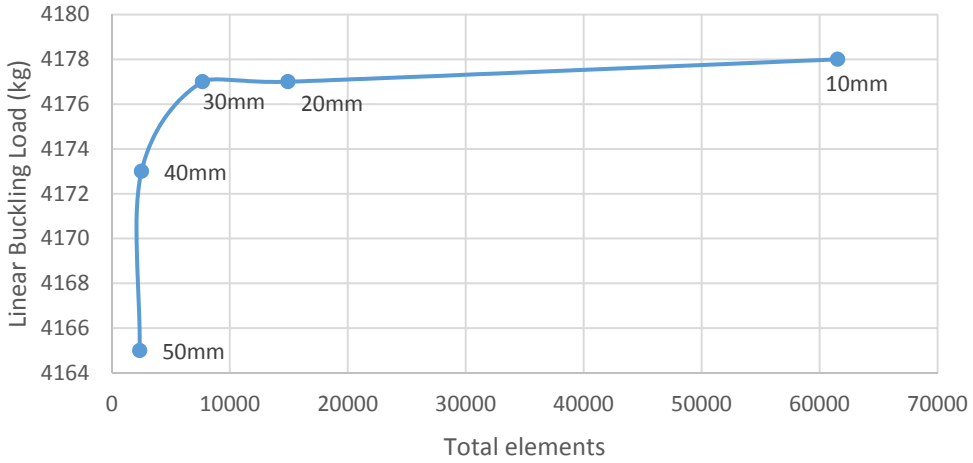


Figure 2 Linear buckling load and total elements

ข้อมูลจากกราฟ พบว่าเมื่อขนาดเอลิเมนต์เล็กลงจะทำให้กำลังรับแรงตามแนวแกนที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ดีขึ้น ในช่วงเอลิเมนต์ที่มีขนาด 50 – 30 มิลลิเมตร กำลังแรงตามแนวแกนที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้กราฟมีความชันมากซึ่งยังให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีพอ ในช่วงเอลิเมนต์ที่มีขนาด 30 – 10 มิลลิเมตร พบว่ากำลังรับแรงตามแนวแกนที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงทำให้ความชันในกราฟเป็นแนวนอนซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดี จึงสรุปได้ว่าเอลิเมนต์ขนาด 30 มิลลิเมตรของท่อเหล็กกลมขนาด Ø114.3x3.2 มิลลิเมตร ให้ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงตามแนวแกนที่ดีและมีจำนวนเอลิเมนต์น้อยที่สุด ทำให้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมแอนซิสเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

การศึกษาและเปรียบเทียบการวิเคราะห์กำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาท่อเหล็กกลมด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับมาตรฐานการออกแบบ

การศึกษากำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาท่อเหล็กกลมที่มีความยาวเสาต่างกันโดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับมาตรฐานการออกแบบ AISI (1996) และ AISI(2016)

โดยใช้เสาท่อเหล็กกลมขนาด Ø114.3x3.2 มิลลิเมตร ที่มีความยาวของเสา 4 ช่วงคือ 500, 3000, 9000 และ 18,000 มิลลิเมตร เอลิเมนต์ขนาดคือ 30 มิลลิเมตร ซึ่งกำลังรับแรงตามแนวแกนที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์และการคำนวณตามมาตรฐานการออกแบบที่ได้จะถูกแสดงข้อมูลในตารางที่ 1

Table 1 Comparison of axial strength between FEA and Standard code

Pipe	Length (mm)	FEA Nonlinear (kg)	AISI (2016) (kg)	AISI (1996) (kg)
Ø114.3x3.2	500	26,645	26,545	26,631
Ø114.3x3.2	3,000	21,021	19,990	22,098
Ø114.3x3.2	9,000	4,060	3,741	4,266
Ø114.3x3.2	18,000	1,046	935	1,067

จากข้อมูลในตารางจะเห็นได้ว่าความยาวเสานั้นมีผลต่อกำลังรับแรงตามแนวแกนของเสา เมื่อเสาสั้นจะสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าเสายาวเนื่องจากมีค่าความชะลูดเสาน้อยกว่า จากมาตรฐานการออกแบบที่ตีพิมพ์ล่าสุด AISC (2016), SSRC (2010) และ AISI (2016) พบว่าสมการคำนวณเสาท่อเหล็กกลมเหมือนกัน ซึ่งเป็นสมการคำนวณที่ถูกปรับปรุงมาเรียบร้อยแล้ว เมื่อเทียบกับมาตรฐานการออกแบบ AISI (1996) จะให้ค่าน้อยและดีกว่ามาตรฐานเก่า จากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าที่มีค่ามากกว่าเพียงเล็กน้อย ซึ่งใกล้เคียงกับทฤษฎี ซึ่งผลออกมาเป็นที่ยอมรับได้ จากผลลัพธ์ทั้งหมดจะนำมาแสดงในรูปแบบกราฟได้ดังรูปภาพที่ 3

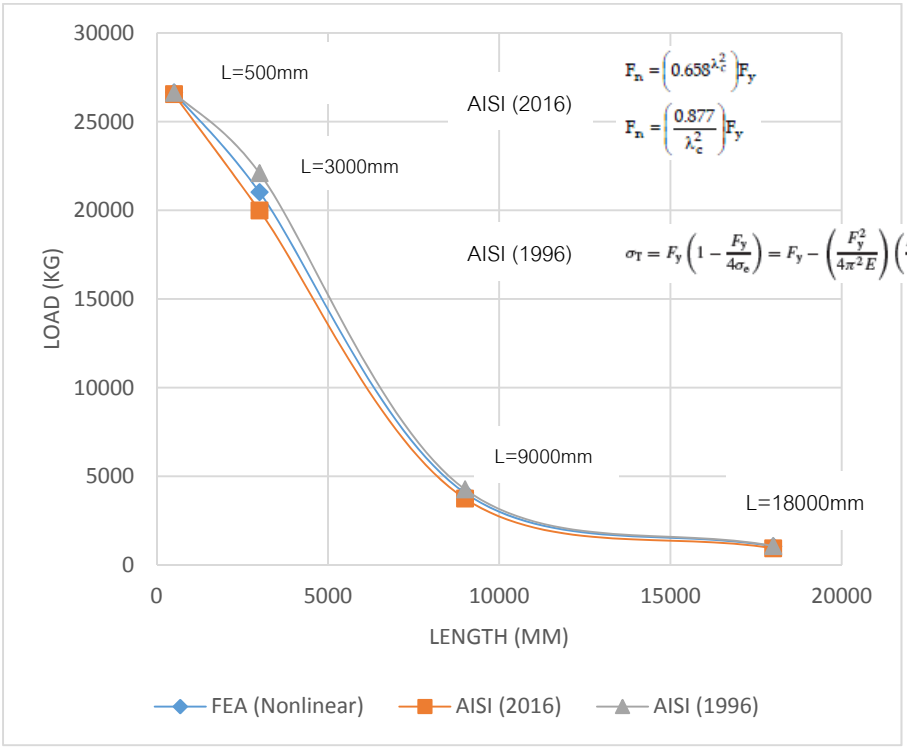


Figure 3 Effect of column length on axial strength

การศึกษากำลังรับน้ำหนักของเสาท่อเหล็กประกอบ 3 ท่อที่ไม่มีตัวค้ำยัน

การศึกษากำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาท่อเหล็กประกอบ 3 ท่อที่ไม่มีตัวค้ำยันจะแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ซึ่งแต่ละแบบจะมีชิ้นส่วนเสาที่นำมาใช้ประกอบไม่เหมือนกันและมีลักษณะของฐานรองรับต่างกัน โดยจะกำหนดให้แผ่นเหล็กที่ปลายเสามีพฤติกรรมแบบจุดหมุด โดยอ้างอิงจากรูปแบบของเสาประกอบที่ใช้ก่อสร้างจริงดังที่แสดงในรูปภาพที่ 4

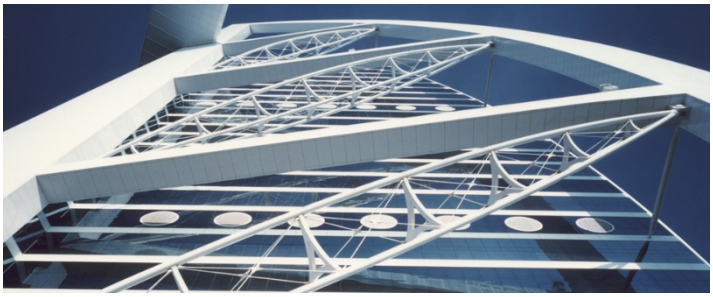


Figure 4 Built-up diagonal bracing structure from burj al arub in dubai

การศึกษารูปแบบของเสาท่อเหล็กกลมประกอบ 3 ท่อที่ไม่มีตัวค้ำยัน จะใช้ท่อเหล็กกลมขนาด Ø114.3x3.2 มิลลิเมตร และมีความยาวเสา 9000 มิลลิเมตร โดยจะนำเสาทั้ง 3 รูปแบบมาเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักของเสาท่อเดี่ยว (4,060 กิโลกรัม) ที่เสมือนว่าใช้ 3 ท่อและมีกำลังเพิ่มขึ้น 3 เท่า (3-ท่อเดี่ยว) คือ 12,180 กิโลกรัม ซึ่งจะแบ่งรูปแบบของเสาประกอบเป็น 3 รูปแบบดังรูปภาพที่ 5

Type 1 Type 2 Type 3

Figure 5 Modeling of the built-up 3 tube columns with various types of member

รูปแบบที่1 เสาท่อเหล็กกลมประกอบ 3 ท่อที่มีชิ้นส่วนเสาตรง 3 ท่อ โดยปลายชิ้นส่วนของเสาจะวางเรียงเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม โดยกำหนดให้ระยะความกว้างของฐานสามเหลี่ยมเท่ากับ 800 มิลลิเมตร และความสูงของสามเหลี่ยมเท่ากับ 600 มิลลิเมตร

รูปแบบที่2 เสาท่อเหล็กกลมประกอบ 3 ท่อที่มีชิ้นส่วนเสาตรง 2 ท่อและเสาดัดโค้ง 1 ท่อ โดยปลายชิ้นส่วนของเสาจะวางเรียงกันเป็นเส้นตรง ซึ่งมีระยะความกว้างระหว่างเสาเท่ากับ 400 มิลลิเมตร และระยะการโก่งตัวสูงสุดที่กึ่งกลางของเสาดัดโค้งเท่ากับ 600 มิลลิเมตร โดยกำหนดเส้นโค้งตามสมการ $y = A\sin(\pi x/L)$

รูปแบบที่3 เสาท่อเหล็กกลมประกอบ 3 ท่อที่มีชิ้นส่วนเสาดัดโค้ง 3 ท่อ โดยปลายชิ้นส่วนของเสาจะรวมอยู่จุดเดียวกัน และมีระยะการโก่งตัวสูงสุดที่กึ่งกลางของของเสาดัดโค้งเท่ากับ 600 มิลลิเมตร โดยกำหนดเส้นโค้งตามสมการ $y = A\sin(\pi x/L)$

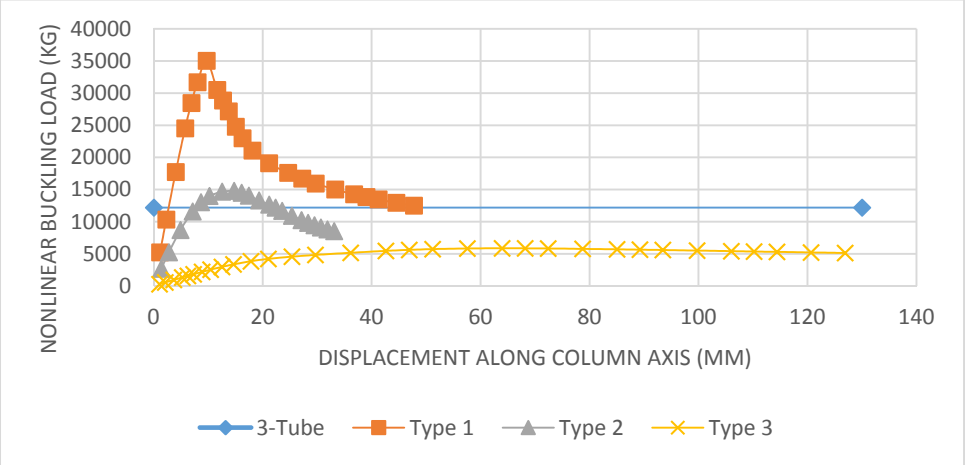


Figure 6 Load and deflection of the built-up 3 tube columns without bracing

จากกราฟเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวตามแนวแกนและแรง พบว่ากำลังรับน้ำหนักของเสาประกอบรูปแบบที่1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับเสารูปแบบอื่นๆและเสาท่อเดี่ยวที่มีกำลัง 3 เท่าเนื่องจากเสาทั้งหมดเป็นเสาตรงและฐานรองรับแผ่นเหล็กปลายเสามีจุดหมุนอยู่ที่จุดศูนย์ถ่วงของแผ่นเหล็ก ซึ่งไม่ตรงกับเสาท่อเหล็กกลมที่ยึดอยู่ จึงมีผลทำให้พฤติกรรมที่ปลายท่อเสมือนกึ่งยึดแน่น กำลังรับน้ำหนักที่ได้เท่ากับ 35,000 กิโลกรัม ซึ่งมากกว่ากำลัง 3 เท่าของเสาท่อเดี่ยวอยู่ 22,820 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 287% ในขณะที่เสาประกอบรูปแบบที่3 เป็นท่อดัดโค้งทั้งหมด เมื่อมีแรงมากระทำจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดภายในเสาทุกต้น จึงทำให้เกิดการโก่งเดาะได้ง่ายและมีกำลังรับน้ำหนักต่ำที่สุด และเสาประกอบรูปแบบที่2 มีกำลังรับน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 14,784 กิโลกรัม ซึ่งอยู่ระหว่างเสาประกอบรูปแบบอื่นๆ

การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาประกอบที่มีการค้ำยันด้านข้าง

การศึกษาระยะดัดโค้งสูงสุดที่กึ่งกลางเสา H จะอ้างอิงโดยนำโมเดลของเสาประกอบรูปแบบที่2 มาใช้วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบอินอิลาสติก โดยจะมีการนำตัวค้ำยันด้านข้างมาเสริมเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานการโก่งเดาะด้านข้าง ระยะดัดโค้งยังคงอ้างอิงตามสมการ $y = A\sin(\pi x/L)$ ขนาดของตัวค้ำยันที่เพิ่มเข้ามาคือ Ø42.7x2.3 มิลลิเมตร ดังที่แสดงในรูปภาพที่ 7

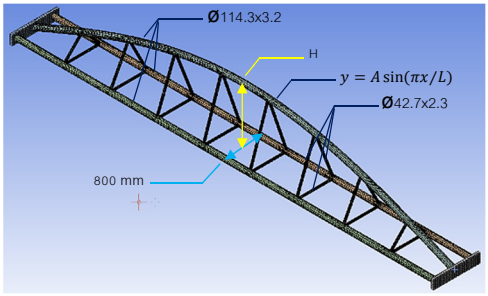


Figure 7 Mesh element of built-up 3 tube columns with bracing

เมื่อนำโมเดลมาศึกษาพฤติกรรมการวิบัติเพื่อหาระยะดัดโค้งสูงสุดกึ่งกลางเสาที่น้อยสุดที่เริ่มทำให้เสาเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติ โดยสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้

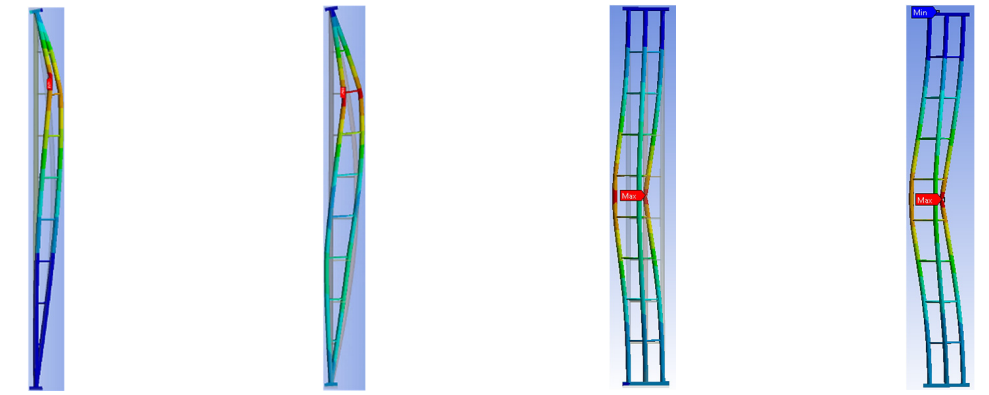


Figure 8 Failure shape of the built-up 3 tube columns type 2 with horizontal bracing

จากพฤติกรรมการวิบัติจะเห็นได้ว่าระยะดัดโค้งสูงสุดที่กึ่งกลางเสา H ของที่น้อยกว่า 800 มิลลิเมตร เสาดัดโค้งจะเกิดการวิบัติที่ระยะ L/4 เนื่องจากอินเนอร์เชียหน้าตัดรวมช่วงกึ่งกลางเสา L/2 มากกว่าจึงทำให้เสาการโก่งเดาะบริเวณจุดที่อ่อนกว่าที่ระยะ L/4 แทน

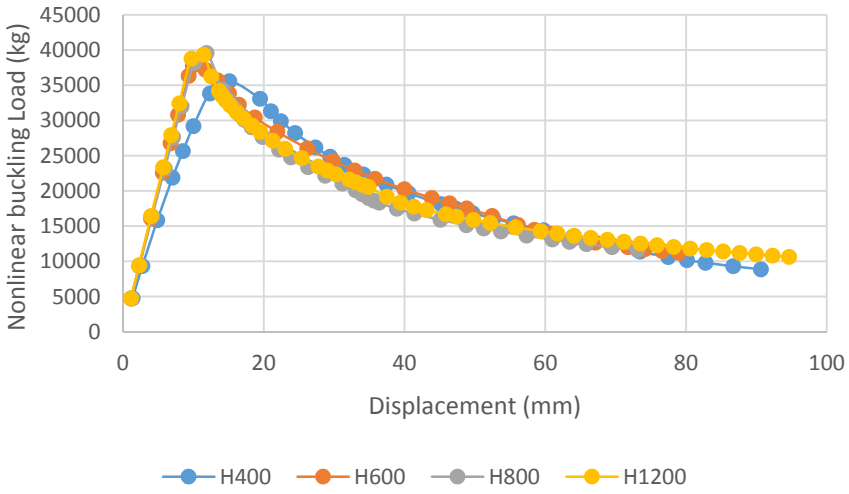


Figure 9 Load and deflection of the built-up 3 tube columns type 2 with horizontal bracing

จากผลลัพธ์ดังกล่าวสรุปได้ว่า H เท่ากับ 800 มิลลิเมตร เสาจะเริ่มวิบัติจากการโก่งเดาะด้านทางด้านเสาตรงเนื่องจากโมเมนต์อินเนอร์เชียของแกนมีค่าน้อยกว่า ซึ่งจุดที่เปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจุดนี้ได้ให้กำลังรับน้ำหนักที่สูงที่สุดคือ 39,572 กิโลกรัม เมื่อ H มีค่ามากกว่า 800 มิลลิเมตร กำลังรับน้ำหนักที่ได้จะไม่มากขึ้นเนื่องจากโมเมนต์อินเนอร์เชียที่ต้านทานการโก่งเดาะของเสาตรงมีค่าโดยประมาณเท่ากับ H 800

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลจากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบเสาท่อเหล็กด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และมาตรฐานการออกแบบ

ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าที่มีค่ามากกว่าเพียงเล็กน้อยและใกล้เคียงกับมาตรฐาน AISI (2016), AISC (2016) และ SSRC (2010) ซึ่งผลออกมาเป็นที่ยอมรับได้

ผลการศึกษากำลังรับน้ำหนักของเสาท่อเหล็กประกอบ 3 ท่อที่ไม่มีตัวค้ำยัน

ผลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ากำลังรับน้ำหนักของเสาประกอบรูปแบบที่1 มากที่สุด เนื่องจากฐานรองรับปลายท่อที่ยึดกับแผ่นเหล็กมีพฤติกรรมเสมือนกึ่งยึดแน่นและท่อที่ใช้เป็นท่อตรงทั้งหมด ซึ่งมีกำลังเป็น 287% ของ 3-ท่อเดี่ยว เสาประกอบรูปแบบที่2 มีกำลังรับน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 14,784 กิโลกรัม ซึ่งมีกำลังคิดเป็น 121% ของ 3-ท่อเดี่ยว เนื่องจากพฤติกรรมของฐานรองรับรวมถึงโมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดรวมมีผลต่อกำลังรับน้ำหนัก และประกอบรูปแบบที่3 มีกำลังรับน้ำหนักน้อยที่สุด เนื่องจากฐานรองรับปลายเสารวมอยู่จุดเดียวกันซึ่งตรงกับจุดศูนย์ถ่วงของแผ่นเหล็กจึงมีพฤติกรรมเสมือนจุดหมุน และท่อเป็นท่อดัดโค้งทั้งหมด จึงทำให้เกิดโมเมนต์ภายในสูง

การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาประกอบที่มีการค้ำยันด้านข้าง

จากการศึกษาเสาประกอบรูปแบบที่2 พบว่าระยะดัดโค้ง H เท่ากับ 800 มิลลิเมตร เป็นจุดเปลี่ยนของรูปแบบการวิบัติและได้ให้กำลังรับน้ำหนักที่สูงที่สุดคือ 39,572 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็น 325 % ของ 3-ท่อเดี่ยว (เพิ่มขึ้น 204% จากที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้าง)

สรุป

เมื่อเสามีความยาวมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงตามแนวแกนลดลง ซึ่งการใช้เสาประกอบจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงตามแนวแกนได้ ในกรณีที่มีตัวค้ำยันจะช่วยทำให้เสามีความแข็งเกร็งมากขึ้นทำให้กำลังต้านทานการโก่งเดาะด้านข้างของเสาเพิ่มมากขึ้นและช่วยลดค่าความชะลูดของเสาด้วยเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมโยธา ทุกท่านที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

AISI S100-16. 2016 **North american specification for the design of cold-formed steel structural members**, CSA Group.

AISC 2016 **360-specification for structural steel buildings**; american institute of steel construction, Inc.

AISI.1996. **Specification for the design of cold formed steel structural members**, Washington, D.C.

Galambos, T.V. 1998. **Guide to stability design criteria for metal structures.** John Wiley & Sons.

Ziemian, R.D. 2010. **Guide to stability design criteria for metal structures.** John Wiley & Sons.

Yu, W.-W. และ R.A. Laboube. 2010. **Cold-formed steel design.** John Wiley & Sons.

Beedle, L.S. 1961. AISC Column Specifications.

O'Shea, M.D. and R.Q. Bridge. 1997. Local buckling of thin-walled circular steel sections with or without internal restraint. **Journal of constructional steel research.** 41: 137-157.

Wang, W. and X. Qiu. 2017. An analytical study for global buckling of circular tubes under axial and oblique compression. **International journal of mechanical sciences.** 126: 120-129.

การพัฒนาระบบการตรวจสอบ และบำรุงรักษาตามความเสี่ยงสำหรับท่อ และอุปกรณ์บนแท่นพักท่อในทะเล

Risk Based Inspection System Development for Piping and Equipment on Riser Platform

นวสิน หอมหวล[1*] กฤษ วงษ์เกษม[1] และ เลิศชัย ระตะนะอาพร[1]

Navasin Homhual[1*], Kris Wonggasem[1] and Lertchai Ratanaarporn[1]

บทคัดย่อ

การตรวจสอบและบำรุงรักษาตามวาระเป็นวิธีที่นิยมใช้ในระบบท่อส่งก๊าซ ซึ่งถูกกำหนดโดยอ้างอิงตามประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก พบว่าวาระที่กำหนดไม่สอดคล้องระหว่างความปลอดภัย และการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า เพื่อแก้ไขปัญหาจึงได้นำระบบการตรวจสอบ และบำรุงรักษาตามความเสี่ยง (Risk Based Inspection) อ้างอิงกระบวนการตามวิธีปฏิบัติดีเอ็นวีอาร์พีจี101 และวิธีการคำนวณตามมาตรฐานเอพีไอ 581 ที่มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ความน่าจะเป็นของความล้มเหลว (Probability of Failure) และผลกระทบของความล้มเหลว (Consequence of Failure) สามารถสรุปเป็นระดับของความเสี่ยง ได้แก่ สูง สูงปานกลาง กลาง และต่ำ โดยเมื่อกำหนดวิธีการตรวจสอบ ตำแหน่ง และวาระการตรวจสอบตามระดับความเสี่ยงนั้นๆ พบว่าท่อและอุปกรณ์บางชุด สามารถขยายความถี่ในการตรวจสอบด้วยสายตา และการตรวจวัดความหนาอุปกรณ์ ได้สูงสุด 5 และ 15 ปีตามลำดับ ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการตรวจสอบ เท่ากับ 268,620 บาท ต่อปี คิดเป็น 70% จากมูลค่าการตรวจสอบตามวาระเดิม ก่อให้เกิดความสอดคล้องระหว่างความปลอดภัย และการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

ABSTRACT

Periodic maintenance and inspection are crucial and ubiquitous approach in the gas pipping system. Generally, the inspection interval and location are determined upon the experience of operators. However, it has been found that the specified interval is inconsistent and inefficient in terms of safety and resource utilization. To solve this issue, Risk Based Inspection (RBI) has been introduced and implemented, according to DNVRPG101 recommended practice and API581 standard. RBI composes of 2 main components; First, Probability of Failure and secondly, Consequence of Failure. Consequently, the risk will be categorized into 4 main levels; high, medium high, medium and low. After applying risk based inspection to determine the inspection period and location based on different level of risks, it allows pipeline and equipment to extend its inspection frequency in visual inspection and equipment thickness measurement to 5 years and 15 years respectively. As a result, RBI helps to reduce the annual inspection expenses by 268,620 Baht, which accounts for 70% of the original inspection expense. Moreover, RBI will result in safe, rigidity, reliable and effective resource usage.

Key Words: Risk based inspection, Maintenance, Process piping

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันพบว่าระบบบำรุงรักษาท่อบนแท่นพักท่อในทะเล ยังคงมีลักษณะการบำรุงรักษาตามวาระ ซึ่งจะถูกกำหนดโดยอ้างอิงตามประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก เช่น การกำหนดความถี่ในการตรวจสอบรายปี และกำหนดตำแหน่งตรวจสอบตามข้องอของท่อ เป็นต้น เมื่อพิจารณาจากจำนวน ประเภทของเส้นท่อ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีจำนวนมากมีลักษณะจำเพาะที่แตกต่างกัน เช่น ของไหลภายในท่อ องค์ประกอบของก๊าซภายในท่อ ความแข็งแรงของท่อ ความดันและอุณหภูมิของท่อ เป็นต้น พบว่าวาระที่กำหนดไม่สอดคล้องระหว่างความปลอดภัย และการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า จากการกำหนดวาระการตรวจสอบท่อและอุปกรณ์ที่มีความถี่เท่ากัน โดยมีความถี่สูงกว่ามาตรฐานสากล ซึ่งในความเป็นจริงแต่ละท่อ และอุปกรณ์มีอัตราการเกิดความเสียหายมากน้อยแตกต่างกันแต่เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานกังวลหากลดความถี่ลงอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยที่สามารถก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการชำรุด รั่วไหล หรือระเบิด ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน สูญเสียรายได้ทางธุรกิจ สูญเสียเงินที่ใช้ในการซ่อมแซม สูญเสียชื่อเสียงของบริษัท และอาจส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นในการดำเนินธุรกิจของบริษัท

ดั้งนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ต้องศึกษา มาตรฐาน และวิธีปฏิบัติสากลทั้งจากทางด้านยุโรป ดีเอ็นวีอาร์พีจี101 และทางด้านอเมริกา เอพีไอ581 ที่อธิบายถึงหลักการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบตามความเสี่ยง (Risk Based Inspection :RBI) ที่มีโดยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ความน่าจะเป็นของความล้มเหลว (Probability of Failure : POF) ซึ่งจะประเมินจากลักษณะความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับท่อด้านการกัดกร่อนภายใน การกัดกร่อนภายนอก การแตกร้าวจากการกัดกร่อน และความเสียหายจากการล้า อีกหนึ่งองค์ประกอบคือ ผลกระทบของความล้มเหลว (Consequence of Failure : COF) ซึ่งจะประเมินทางด้านอันตรายต่อบุคลากร การสูญเสียทรัพย์สิน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อพัฒนาเป็นระบบการตรวจสอบ และบำรุงรักษาตามความเสี่ยงสำหรับท่อ และอุปกรณ์บนแท่นพักท่อในทะเลที่เหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษามาตรฐานสากล และวิธีปฏิบัติที่แนะนำ

จากการศึกษาวิธีปฏิบัติที่แนะนำ และมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้องกับระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาตามความเสี่ยงของท่อและอุปกรณ์บนแท่นพักท่อในทะเล สามารถแบ่งออกเป็น 2 แหล่งด้วยกันคือ วิธีปฏิบัติที่แนะนำจากทางยุโรป ดีเอ็นวีอาร์พีจี101 ซึ่งมีการพัฒนาแนวทางการตรวจสอบและบำรุงรักษาสำหรับท่อ และอุปกรณ์บนแท่นโดยเฉพาะ เหมาะสำหรับการนำกระบวนการจัดทำระบบมาใช้อ้างอิงสำหรับการจัดทำระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาตามความเสี่ยง และมาตรฐานสากลจากทางอเมริกา เอพีไอ581 การตรวจสอบตามความเสี่ยงอ้างอิงจากเอกสารฐานข้อมูล ซึ่งมีขั้นตอน และแหล่งข้อมูลอ้างอิงสำหรับวิธีการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ(Quantitative Risk) อย่างละเอียดจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้กำหนดเป็นขั้นตอนสำหรับการประเมินความเสี่ยงโดยละเอียด เอพีไอ570 และเอพีไอ510 การตรวจสอบ และบำรุงรักษาระบบท่อ และถังแรงดันตามลำดับ ซึ่งระบุถึงวิธีการ และแผนการตรวจสอบอุปกรณ์จึงสามารถนำมาใช้ในการช่วยกำหนดความถี่ในการตรวจสอบได้

กระบวนการจัดทำระบบการบำรุงรักษาและการตรวจสอบตามความเสี่ยง

ขั้นตอนการจัดทำระบบการตรวจสอบตามความเสี่ยงตามวิธีปฏิบัติ ดีเอ็นวีอาร์พีจี 101 (DNVRPG101) มีการพัฒนาระบบเพื่อใช้กับท่อ และอุปกรณ์คงที่ บนแท่นในทะเลโดยเฉพาะ จึงกำหนดเป็นกระบวนการหลักของงานวิจัยนี้ โดยมีทั้งหมด 6 ขั้นตอน การรวบรวมข้อมูล (Information Gathering) การจัดกลุ่มการกัดกร่อน (Corrosion loop) การวิเคราะห์เพื่อคัดกรอก (Screening Analysis) การประเมินโดยละเอียด (Detail assessment) การวางแผน (Planning) การดำเนินการ และการวิเคราะห์ผล (Execution and Evaluation) (Det Norske Veritas. (2010)) (Figure 1)

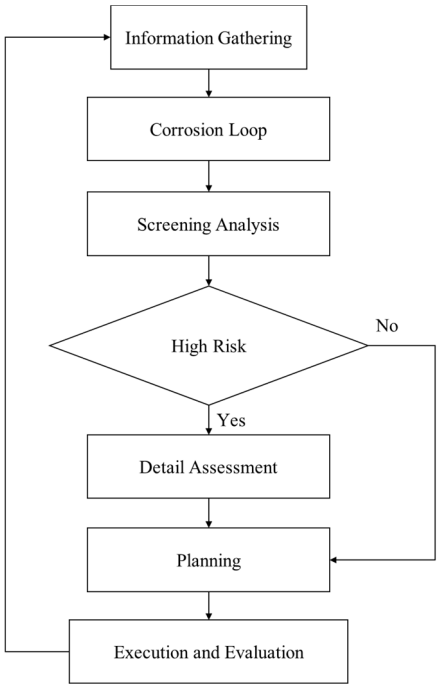


Figure 1 Risk based inspection system according to DNVRPG101

การรวบรวมข้อมูล (Information Gathering)

ในการประเมินความเสี่ยง ของท่อและอุปกรณ์ ต้องใช้ข้อมูลการออกแบบ กระบวนการดำเนินงาน วิธีการตรวจสอบ และผลกระทบ เช่น วัสดุ ความดัน อุณหภูมิ ขนาด สารภายใน และองค์ประกอบของสารภายใน ผลกระทบหากเกิดความเสียหาย ลักษณะการเสื่อมสภาพ วิธีการตรวจสอบ ผลการตรวจสอบเดิม และแบบ (Drawing)

การจัดกลุ่มการกัดกร่อน (Corrosion loop)

จัดกลุ่มการกัดกร่อนของกลุ่มท่อที่มีการสัมผัสการกัดกร่อนรูปแบบเดียวกัน มีการดำเนินงาน วัสดุ และมีผลิตภัณฑ์ภายในที่มีส่วนประกอบเหมือนกัน สามารถทราบหลักการเกิดความเสียหายได้ ซึ่งกลุ่มการกัดกร่อนเป็นกระบวนการที่ช่วยเหลือสำหรับวางแผนการตรวจสอบ ไม่จำเป็นต้องทำงานซ้ำซ้อนในกลุ่มท่อที่มีลักษณะเหมือนกันโดยวิธีการกำหนดจำเป็นต้องใช้การระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญ และผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้เกิดกลุ่มการกัดกร่อนที่เหมาะสมกับการทำงาน และแนวทางการตรวจสอบอีกด้วยโดนตัวอย่างแผนภาพของกลุ่มการกัดกร่อน (Chang, Chang, Shu and Lin (2005))

การประเมินเพื่อคัดกรอง (Screening Analysis)

การประเมินเพื่อคัดกรองเป็นลักษณะการประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพ (Qualitative Risk) โดยอาศัยความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในการประเมิน จึงต้องทำการระดมสมองของผู้ปฏิบัติงาน และผู้เชี่ยวชาญในบริษัท ทดลองเพื่อกำหนดโอกาสเกิดความล้มเหลว (Probability of Failure) ครอบคลุม 4 ปัจจัย คือ การกัดกร่อนภายนอก การกัดกร่อนภายใน การแตกร้าวจากการกัดกร่อน และความล้า และผลกระทบเมื่อเกิดความล้มเหลว (Consequence of Failure) ครอบคลุม 3 ปัจจัย คือ การสูญเสียสินค้ามูลค่าการซ่อมแซมทรัพย์สิน การฟื้นฟูสภาพแวดล้อม และอันตรายต่อบุคคลทำงาน สำหรับระบุถึงระดับความเสี่ยงของแต่ละท่อและอุปกรณ์เพื่อคัดกรองท่อและอุปกรณ์ ที่มีความเสี่ยงสูงไปดำเนินการประเมินโดยละเอียด และส่วนที่มีความเสี่ยงปานกลาง และต่ำนั้นสามารถกำหนดแนวทางการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุง การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และการบำรุงรักษาเชิงเฝ้าระวัง (Figure 2)

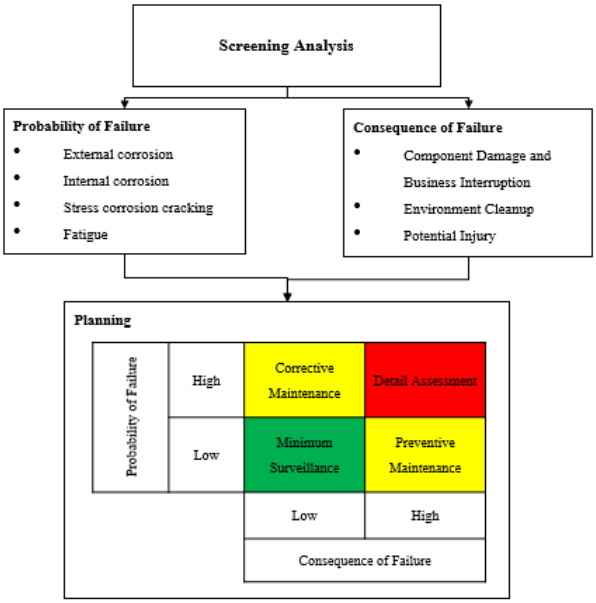


Figure 2 Screening Analysis Process

การประเมินโดยละเอียด (Detail Assessment)

การประเมินโดยละเอียดเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์การตรวจสอบตามความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative Risk) อ้างอิงจากเอกสารฐานข้อมูลตามมาตรฐานเอพีไอ 581 โดนอาศัยผู้ให้ข้อมูล ผู้ประเมินจากผู้ปฏิบัติงาน ทีมงานวิศวกรรมที่มีความเชี่ยวชาญด้านความเสียหายต่อท่อและอุปกรณ์ และผู้บริหารที่เกี่ยวข้องภายในบริษัท ซึ่งการตรวจสอบตามความเสี่ยงประกอบด้วย ความน่าจะเป็นของความล้มเหลว และผลกระทบของความล้มเหลว (Shuai, Han and Xu (2011)) ตามสมการที่1

$$Risk(t) = P_f(t)\ x\ FC \qquad (1)$$

โดยที่ความน่าจะเป็นของความล้มเหลว (Probability of Failure : Pf(t)) มีลักษณะเป็นฟังก์ชั่นของเวลาและจะเพิ่มขึ้นตามความเสียหายที่ถูกสะสมมาแสดงดังสมการที่ 2

$$P_f(t) = gff\ x\ D_f(t)\ x\ F_{MS} \qquad (2)$$

โดยที่ความถี่ของความล้มเหลวทั่วไป (Generic failure frequency : gff) เป็นข้อมูลสถิติที่พัฒนาจากความถี่ของการล้มเหลวของแต่ละอุปกรณ์ จากกลุ่มข้อมูลภาคอุตสาหกรรมโรงกลั่น และปิโตรเคมีอิงตามมาตรฐานเอพีไอ 581

ปัจจัยความเสียหายที่เกิดขึ้นกับท่อ และอุปกรณ์ (Damage factor : $D_f(t)$) คือลักษณะความเสียหายที่สามารถเกิดขึ้นกับท่อ และอุปกรณ์ โดยสามารถกำหนดปัจจัยความเสียหายที่สามารถเกิดขึ้นกับท่อ และอุปกรณ์บนแท่นพักท่อในทะเลได้ทั้งหมด 5 ประเภทคือ ปัจจัยการเสียหายจากผนังบาง (Thinning : D_f^{thin}) การเสียหายจากการกัดกร่อนภายนอก (External corrosion : $D_f^{extcorr}$) การเสียหายจากการกัดกร่อนภายใต้ฉนวนหุ้มท่อ (Corrosion under insulation : D_f^{CUI})การแตกร้าวจากการกัดกร่อน(Stress corrosion cracking : D_f^{SCC}) และการเสียหายจากความล้า (Fatigue : D_f^{mfat}) โดยมีวิธีรวมปัจจัยความเสียหายเข้าด้วยกัน ดังสมการที่ 3

$$D_{f-total} = D_f^{thin} + \max[D_f^{extcorr}, D_f^{CUI}] + D_f^{SCC} + D_f^{mfat} \qquad (3)$$

ปัจจัยของระบบการจัดการ (Management Factor : F_{MS}) เป็นปัจจัยปรับแก้เกี่ยวกับระบบการจัดการความสมบูรณ์แข็งแรงของท่อ และอุปกรณ์ในแต่ละสถานประกอบการ โดยปัจจัยนี้สามารถหาได้จากผลการประเมินระดับของระบบการจัดการที่ส่งผลต่อความเสี่ยงที่เกิดขึ้นครอบคลุมกระบวนการจัดการความปลอดภัย (Process Safety Management) ที่ส่งผลกระทบโดยตรง และโดยอ้อมต่อความสมบูรณ์แข็งแรง

ผลกระทบของความล้มเหลว (Consequence of failure : FC) การรั่วไหลของสารอันตรายจากกระบวนการที่อุปกรณ์มีความดัน อาจสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ข้างเคียง การบาดเจ็บของผู้คน การสูญเสียสินค้า และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลกระทบของความล้มเหลวจะประเมินออกมาได้เป็น 2 รูปแบบ คือ พื้นที่ได้รับผลกระทบ และมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยระเบียบวิธีการประเมินตามเอพีไอ581 แบ่งเป็น 2 ระดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ในระดับที่ 1 ที่ไม่จำเป็นต้องใช้โปรแกรม หรือเทคนิคแบบจำลองโดยเฉพาะในการคำนวณ โดยรายการตัวแทนของเหลวได้ผ่านการวิเคราะห์ผ่านซอฟแวร์แบบจำลอง ที่ระบุไว้ในข้อมูลตารางตามมาตรฐาน เอพีไอ581

การจัดระดับความเสี่ยงเชิงปริมาณสามารถแบ่งความเสี่ยงออกเป็น 4 ระดับ คือ ความเสี่ยงสูง สูงปานกลาง ปานกลาง และต่ำ โดยใช้เกณฑ์การแบ่งระดับความน่าจะเป็นของความล้มเหลว และผลกระทบหากเกิดความล้มเหลว ได้เป็น 5 ระดับ เรียงลำดับความรุนแรงจากน้อยไปมาก (American Petroleum Institute. (2016)) (Figure 3)

โดยวิธีการประเมินโดยละเอียดอ้างอิงตามมาตรฐานเอพีไอ 581 ที่มีการระบุขั้นตอนการประเมินอย่างละเอียดในแต่ละขั้นตอนประกอบด้วยสมการการคำนวณมากกว่า 90 สมการ ซึ่งจำนวนสมการขึ้นอยู่กับลักษณะความเสียหายในแต่ละสถานประกอบการที่มีโอกาสเกิดความเสียหายแตกต่างกัน

การกำหนดแผนการตรวจสอบ

โดยจากการศึกษามาตรฐานการตรวจสอบท่อ เอพีไอ 570 และถังความดัน เอพีไอ 510 พบว่าความถี่ในการตรวจสอบท่อ และถังความดัน สำหรับสารทำงานที่เป็นก๊าซธรรมชาติ ได้กำหนดความถี่การตรวจสอบสูงสุดด้วยสายตาทุก 5 ปี ความถี่การตรวจวัดความหนาท่อสูงสุดทุก 10 ปี และความถี่ในการตรวจสอบความหนาท่อจะต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของอายุอุปกรณ์คงเหลือ ทั้งนี้มาตรฐานยังคงระบุเพิ่มเติมถึงกรณีที่ระบบท่อ และอุปกรณ์มีการประเมินการตรวจสอบ และบำรุงรักษาตามความเสี่ยงตามมาตรฐาน เอพีไอ581 แล้วนั้นจะสามารถขยายความถี่ในการตรวจสอบออกไปได้มากกว่า 10 ปี ตามผลการประเมินความเสี่ยง (Table 1)

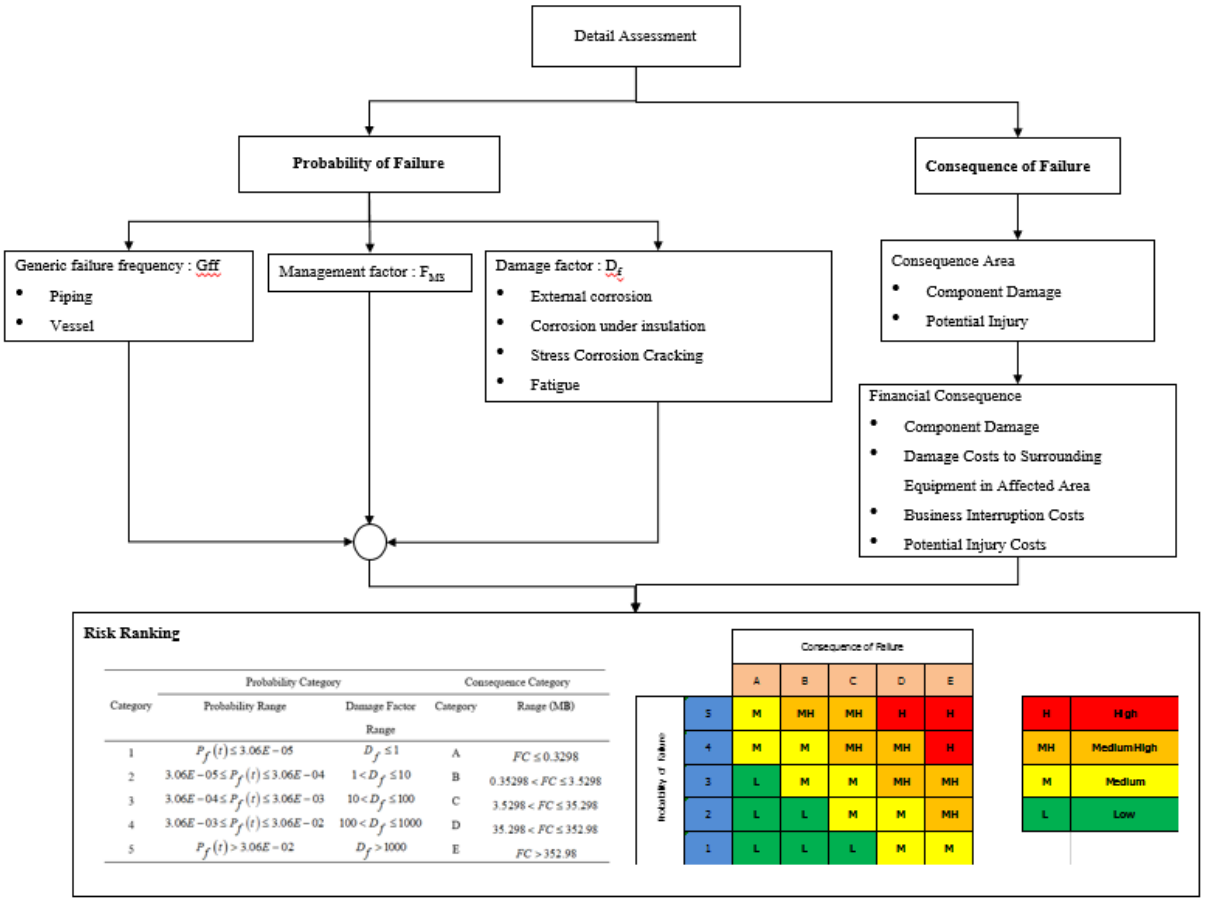


Figure 3 Detail Assessment Process

Table 1 Risk Based Inspection Frequency

Risk level	Frequency (Year)	
	Visual Inspection	Wall Thickness Inspection
High	1	Min[1, Remaining Life/2]
Medium High	1	Min[5, Remaining Life/2]
Medium	2	Min[10, Remaining Life/2]
Low	5	Min[15, Remaining Life/2]

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

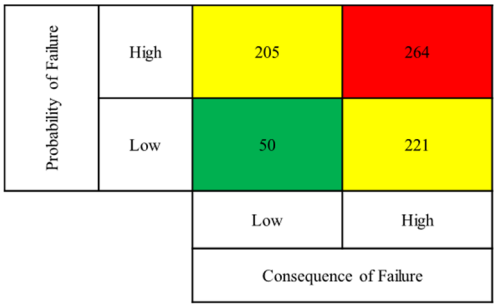
ผลการประเมินเพื่อคัดกรอง (Screening Analysis)

จากการประยุกต์แท่นพักท่อในทะเลกรณีศึกษาซึ่งมีระบบท่อ 547 เส้น และอุปกรณ์ 193 ชิ้นส่วนถังแรงดัน และความถี่การตรวจสอบตามวาระ แบ่งเป็นการตรวจสอบด้วยสายตา และการตรวจวัดความหนาอุปกรณ์ที่ความถี่ 1 และ 5 ปี (Table 2)

Table 2 Frequency of Periodic Inspection

Frequency of Periodic Inspection (Year)	
Visual Inspection	Wall Thickness Inspection
1	5

และผลการประเมินเพื่อคัดกรอง (Screening Analysis) ตามเกณฑ์ความเสี่ยงเชิงคุณภาพระดับความเสี่ยง ท่อ และอุปกรณ์สำหรับประเมินโดยละเอียด (Detail Assessment) จำนวน 264 หน่วย วางแผนการตรวจสอบเชิงแก้ไขปรับปรุงจำนวน 205 เชิงป้องกันจำนวน 221 และเชิงเฝ้าระวังจำนวน 50 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประเมินเพื่อคัดกรองช่วยลดจำนวนอุปกรณ์ที่ต้องใช้ทรัพยากรสำหรับการประเมินโดยละเอียด ของท่อ และส่วนประกอบถังความดันคิดเป็น 30% และ 51% ตามลำดับซึ่งช่วยลดทรัพยากรสำหรับใช้ในการประเมินโดยละเอียดลงไปได้จำนวนมาก (Figure 4)

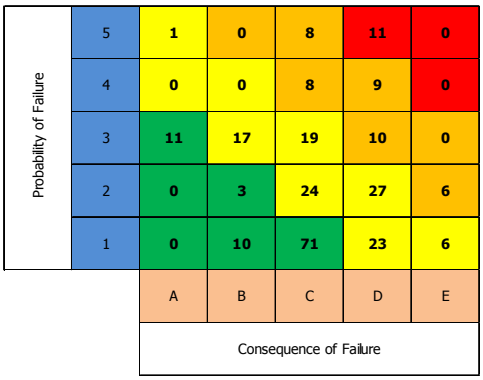


Maintenance Program	Vessel Component (Percent)	Piping system (Percent)
Detail Assessment	98 (51%)	166 (30%)
Preventive Maintenance	11 (6%)	210 (38%)
Corrective Maintenance	60 (31%)	145 (27%)
Minimum Surveillance	24 (12%)	26 (5%)
Total	193 (100%)	547 (100%)

Figure 4 Screening Analysis Result

ผลการประเมินโดยละเอียด (Detail assessment)

จากผลการประเมินความน่าจะเป็นของความล้มเหลวและผลกระทบหากเกิดความล้มเหลว สามารถจัดลำดับความเสี่ยงตารางความเสี่ยงจากผลการประเมิน และสรุปผลการประเมินความเสี่ยงของส่วนประกอบถังความดันแบ่งตามระดับความเสี่ยง สูง สูงปานกลาง ต่ำ มีจำนวนเท่ากับ 11 33 51 และ 3 คิดเป็นเป็น 11% 34% 52% และ 3% ตามลำดับ และท่อ มีจำนวนเท่ากับ 0 8 66 และ 92 คิดเป็น 0% 5% 40% และ 55% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 5



Risk Level	Vessel Component		Piping	
	Number	Percent	Number	Percent
High	11	11%	0	0%
Medium High	33	34%	8	5%
Medium	51	52%	66	40%
Low	3	3%	92	55%

Figure 5 Detail Assessment Result

สรุป

จากผลประเมินความเสี่ยงเมื่อกำหนดแผนการตรวจสอบ และคำนวณค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบต่อปี เปรียบเทียบกับการตรวจสอบตามวาระ โดยคำนวณค่าใช้จ่ายการตรวจวัดความหนาอุปกรณ์ อ้างอิงจากประวัติการจ้างผู้รับเหมาดำเนินการตรวจสอบ และการตรวจสอบด้วยสายตาอ้างอิงราคาต่อช่วงโมงการทำงานของพนักงานบนแท่นพักท่อในทะเลเท่ากับ 750 และ 213 บาท ต่ออุปกรณ์ ตามลำดับ พบว่าค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบตามความเสี่ยง และการตรวจสอบตามวาระ มีมูลค่าเท่ากับ 81,498 และ 268,620 บาทต่อปี ตามลำดับ ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 187,122 บาท ต่อปี หรือคิดเป็น 70% ของการตรวจสอบตามวาระเดิม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัย และพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

American Petroleum Institute. 2016. **API Recommended Practice 581 Risk-Based Inspection Methodology.** 3rd ed. API, Washington, D.C.

_____, 2016. **API 570, Piping Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair and Alteration of Piping Systems** 4th ed. API Publishing Services, Washington, DC.

_____, 2014. **API 510, Pressure Vessel Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration** 4th ed. API Publishing Services, Washington, DC.

Det Norske Veritas. 2010. **Risk Based Inspection of Offshore Topsides Static Mechanical Equipment.** Det Norske Veritas, n.p.

Chang, M-K., R-R. Chang, C-M. Shu and K-N. Lin. 2005. Application of risk based inspection in refinery and processing piping. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries** 18: 397–402.

Shuai, J., K. Han and X. Xu. 2012. Risk-based inspection for large-scale crude oil tanks. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries** 25: 166-175.

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์เสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเพื่อออกแบบให้เหมาะสมโดยภาษาพีเอชพีไฮเปอร์เท็กซ์พรีโปรเซสเซอร์

Development of A Program for Analysis of A Transmission Line Tower for Optimization Design by Using PHP Hypertext Preprocessor Language

เสรี องคะสุวรรณ[1*] และ สมโพธิ์ วิวิธเกยูรวงศ์[1]

Seree Ongkasuwan[1*] and Sompothi Vivithkeyoonvong[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้เพื่อพัฒนาระบบวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง พัฒนามาจากวิธีสตีฟเนส เพื่อช่วยการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงอย่างเหมาะสม โครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นโครงสร้างชนิดสามมิติ ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนและจุดต่อจำนวนมาก การออกแบบโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่เหมาะสม ต้องใช้เวลาจำนวนมาก เกี่ยวข้องกับการสมมุติข้อมูลและลองค่าต่างๆ ขบวนการนี้เริ่มต้นด้วยจากการวิเคราะห์ โดยหาแรงภายในแต่ละชิ้นส่วนในโครงสร้าง จากแรงกระทำชนิดต่างๆแล้ว เลือกชิ้นส่วนที่มีค่าแรงภายในสูงสุด จากกลุ่มของแรงที่กระทำเหล่านั้น นำมาออกแบบชิ้นส่วน ขบวนการนี้จะถูกทำซ้ำจนกระทั่งหน้าตัดของชิ้นส่วนทั้งหมดไม่มีการเปลี่ยนแปลงผลการวิเคราะห์และการออกแบบเช่นนี้ จะได้หน้าตัดที่เหมาะสมที่สุด

ABSTRACT

This literature is aiming to develop transmission line tower structure analysis method, which is developed from stiffness method, to design transmission line tower efficiently. The type of transmission line tower structure is 3D-structure which including many members and joints. For efficiently in transmission line tower structure design, it takes lots of time that relates to parametric study, conditions and the method of trial and error. The first step is to analyze internal force of each member from structure. Then, Selecting the highest internal forced member to design. This method will be re-calculated until section area of all members not changing. This method will give the best result of efficient section area.

Key Words: transmission line tower, structure analysis program

*Corresponding author; e-mail address: t59_1@hotmail.com

[1]ภาควิชาโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

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

คำนำ

การสร้างซอฟต์แวร์ที่ดีและง่ายต่อการใช้งานเป็นสิ่งสำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในงานวิศวกรรมที่เป็นตัวกลางเชื่องโยงระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ ถ้าหากซอฟต์แวร์มีข้อบกพร่องหรือมีข้อจำกัดมากคอมพิวเตอร์ก็ไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มที่ และอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นด้วย ดังนั้นซอฟต์แวร์ที่ดีจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีระบบที่เข้าใจง่าย ง่ายต่อการใช้งาน และสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้ง่าย

โปรแกรมที่ออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่าย สามารถตรวจสอบการป้อนข้อมูล (Input) และการแสดงผล (Output) มีความสำคัญอย่างยิ่งดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมโดยนำรูปแบบการป้อนข้อมูลและแสดงผลทางกราฟิก ผู้พัฒนาโปรแกรมจำเป็นต้องมีความรู้ทางด้านโครงสร้างของภาษาที่ใช้พัฒนาระบบข้อมูล ระบบการแสดงข้อมูล ระบบการแสดงกราฟิก และกระบวนการในการวิเคราะห์โครงสร้าง ในแต่ละขั้นตอนเป็นอย่างดี เพื่อพัฒนาโปรแกรมให้ผู้ใช้สามารถนำไปใช้ได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ

โปรแกรม TL-TOWERA ที่พัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์โครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้เหมาะสมที่สุดโปรแกรม ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องจำนวนจุดต่อ จำนวนชิ้นส่วน สามารถแก้ไขตำแหน่งจุดต่อ โดยการป้อนข้อมูลทางกราฟิกและแสดงผลทางกราฟิก พร้อมทั้งสามารถเปลี่ยนมุมมองของโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในแบบ สองมิติ และสามมิติ เพื่อสะดวกในการป้อนข้อมูลที่เป็นโครงสร้างสามมิติ ทำให้ง่ายต่อการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ป้อนเข้าไป นอกจากนี้แล้วยังสามารถป้อนข้อมูลอย่างรวดเร็ว โดยมีสำเนาโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสำเร็จรูปอยู่ในโปรแกรมแล้ว

วิธีการ

1. แบบโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

1.1 โครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ที่นำมาวิจัยนี้เป็นแบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ชนิด LDC2 ดังแสดงในFigure 1 โดยมีรูปร่างและขนาดดังนี้

1.1.1. ความสูงของโครงสร้างเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงเท่ากับ 42.73 เมตร ไม่รวมฐานที่เป็นคอนกรีต) (เมตร 0.55 ซึ่งสูง

1.1.2. รูปตัดด้านบนของโครงสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

1.1.3. ความกว้างส่วนบนสุดของตัวโครงสร้างอยู่ในช่วง เมตร 1.30 เมตร ถึง 1.10

1.1.4. ความกว้างที่เอว หรือจุดเปลี่ยนความชัน ของส่วนบนและส่วนล่างอยู่ในช่วง เมตร 1.40 เมตร 2.00 ถึง

1.1.5. ความกว้างที่ฐาน ตั้งแต่ เมตร 7.60 เมตร ถึง 5.20

1.1.6. จุดต่อเป็นโครงข้อหมุน 3มิติ พิจารณาให้รับโมเมนต์ได้บางส่วน

1.1.7. ช่วงของแกงแนง และความยาวของแขน ที่รับสายไฟฟ้าแรงสูง กำหนดไว้ใน Figure 1

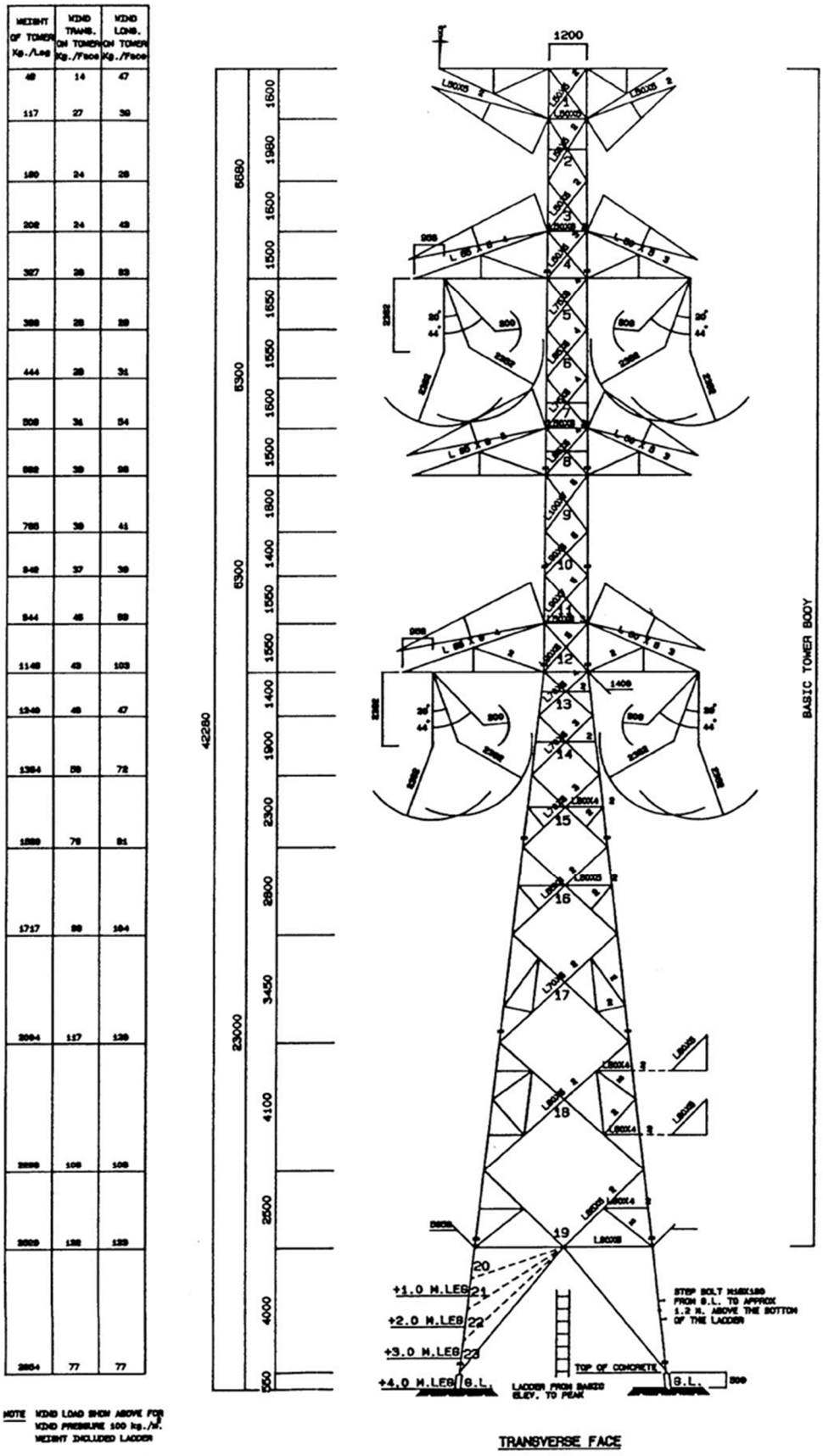
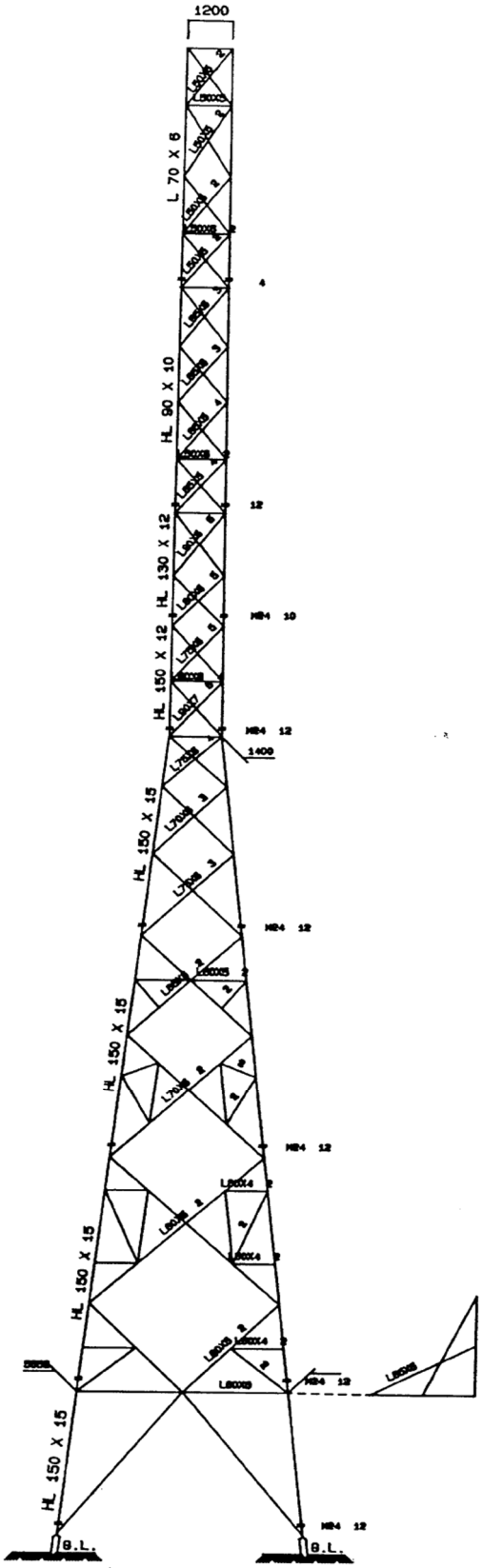
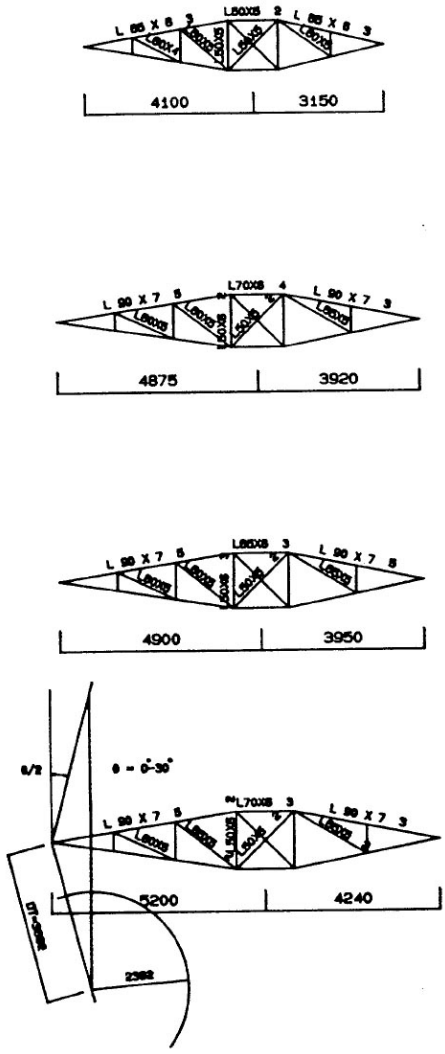


Figure 1 Transmission line tower structure type LDC2



LOGITUDINAL FACE

Figure 1 (Cont.)



LOADING CASES

For two circuits.
- case 1 Extreme transverse wind, OLF = 1.3
- case 2 Extreme longitudinal wind, OLF = 1.3
- case 3 Extreme oblique wind, OLF = 1.3
- case 4 Broken wires, OLF = 1.1
  - 4.1 Two GW. wires broken.
  - 4.2 One GW. wire & any one of top conductors broken.
  - 4.3 One GW. wire & any one of middle conductors broken.
  - 4.4 One GW. wire & any one of bottom conductors broken.
  - 4.5 Top conductors broken.
  - 4.6 Middle conductors broken.
  - 4.7 Bottom conductors broken.
  - 4.8 Top & middle conductors on the same side broken.
  - 4.9 Top & bottom conductors on the same side broken.
  - 4.10 Middle & bottom conductors on the same side broken.
- case 5 Broken insulator strings, OLF = 1.1
  - 5.1 Any one of top insulator strings broken.
  - 5.2 Any one of middle insulator strings broken.
  - 5.3 Any one of bottom insulator strings broken.
- case 6 Maintenance, OLF = 1.3
  - 6.1 Any one of GW. wire.
  - 6.2 Any one conductor.

For one circuit.
- case 7 Extreme transverse wind, OLF = 1.3
- case 8 Extreme longitudinal wind, OLF = 1.3
- case 9 Extreme oblique wind, OLF = 1.3
- case 10 Broken wires, OLF = 1.1
  - 10.1 GW. wire broken.
  - 10.2 Top conductor broken.
  - 10.3 Middle conductor broken.
  - 10.4 Bottom conductor broken.
- case 11 Broken insulator strings, OLF = 1.1
  - 11.1 Top insulator strings broken.
  - 11.2 Middle insulator strings broken.
  - 11.3 Bottom insulator strings broken.
- case 12 Maintenance, OLF = 1.3
  - 12.1 GW. wire.
  - 12.2 Conductor.

NOTES
1. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETER.
2. BLANK MEMBERS ARE L 50X4
3. BLANK BOLTS ARE M16 1
4. NO INDICATED BOLTS ARE M16
5. STRUCTURAL STEEL JIS G3101 SS-41 (MARKED "L").
   JIS G3101 SS-55 (MARKED "HL").
6. SPRING WASHER ASA B27.1
7. BOLT & NUT ASTM A394
8. GALVANIZING ASTM A123, A153

Figure 1 (Cont.)

1.1.8. โครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงชนิด LDC2 นั้น ต้องมีการใส่แกงแนง (Bracing) ภายในชนิด Double Warren เป็นลักษณะกากบาท และมีการใช้ชิ้นส่วนช่วย (Redundant Member) ซึ่งใช้กับโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ขนาดปกติมีแรงดันไฟฟ้า กิโลโวลต์ 230หรือใหญ่กว่า เพราะให้ความมั่นคงทางโครงสร้างสูง

2. แรงกระทำต่อโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

แรงกระทำต่อโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง แบ่งออกเป็น ประเภท คือ 2

2.1 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากขนาดสายส่งไฟฟ้าแรงสูงประเภทนี้ไม่เปลี่ยนแปลง ตามขนาดของโครงสร้าง และจะกำหนดโดยผู้ออกแบบขนาดสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ประกอบด้วย

2.1.1 น้ำหนักของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

2.1.2 แรงลมกระทำต่อตัวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

2.1.3 แรงขึงดึง)Tensionในการติดตั้ง หรือ กรณีสายขาด (

2.2 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างเสาสายส่ง เนื่องจากแรงลมและน้ำหนักของโครงสร้างนี้ จะเปลี่ยนไปตามขนาดของชิ้นส่วนของโครงสร้างด้วย ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนเช่น น้ำหนักต่อความยาว ความกว้างของชิ้นส่วนที่เปลี่ยนไป ประกอบด้วย

2.2.1 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากแรงลม ซึ่งอาจจะทำให้เกิดแรงดันที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากแรงที่กระทำเนื่องจากแรงลม มีค่าเท่ากับความดันลมที่ กำหนดคูณด้วยพื้นที่ของชิ้นส่วนรวม ของด้านที่ลมกระทำ

2.2.2 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างของเสาเอง ได้แก่น้ำหนักของชิ้นส่วนทั้งหมด รวมกับน้ำหนักของอุปกรณ์อันได้แก่ สลักเกลียว และแผ่นเหล็กปะกับ โดยทั่วไปจะใช้เท่ากับ เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นส่วนของโครงสร้าง 15

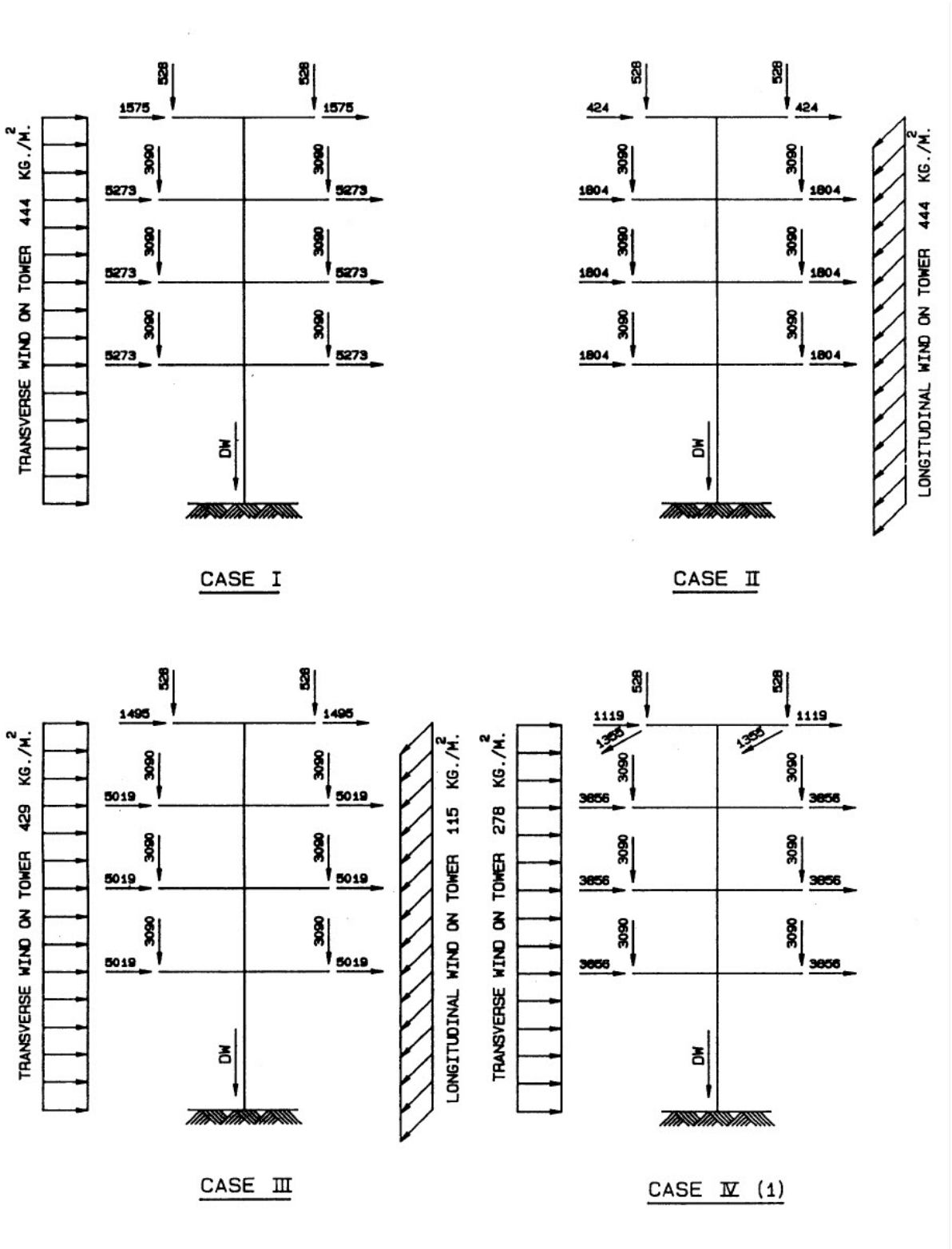
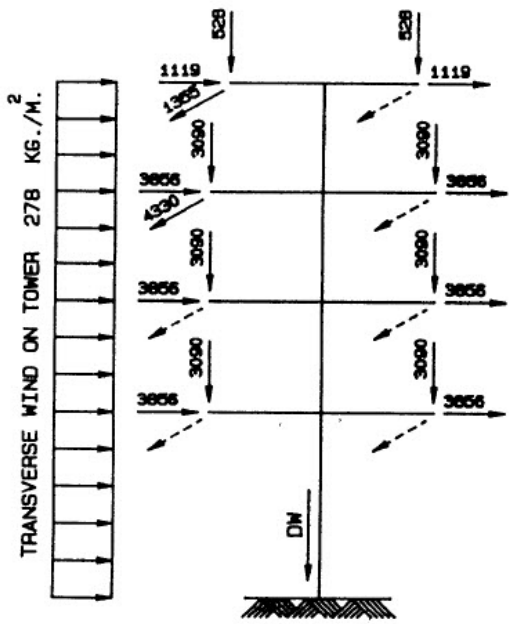
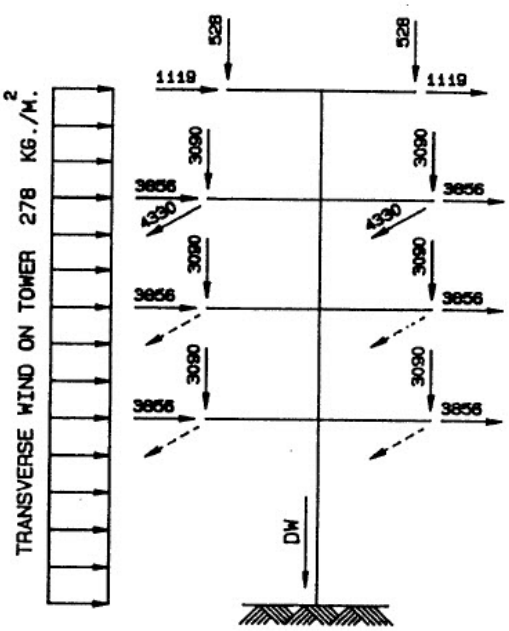


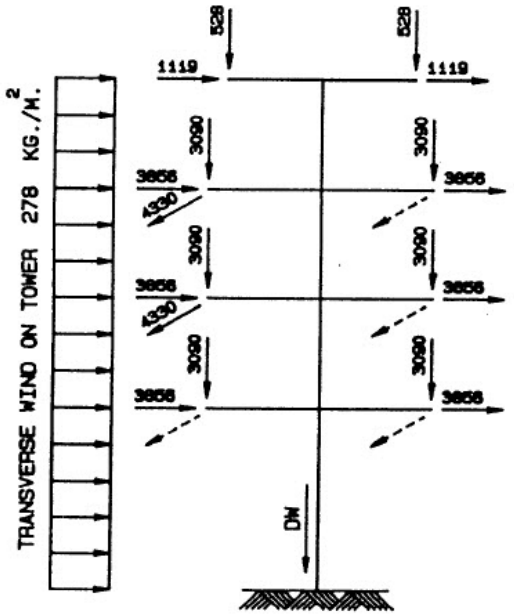
Figure 2 Transmission line tower force of direction for analysis member force



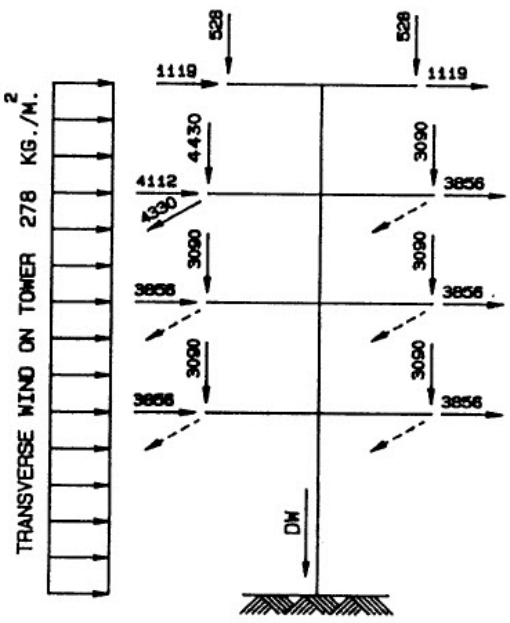
CASE IV (2, 3, 4)



CASE IV (5, 6, 7)

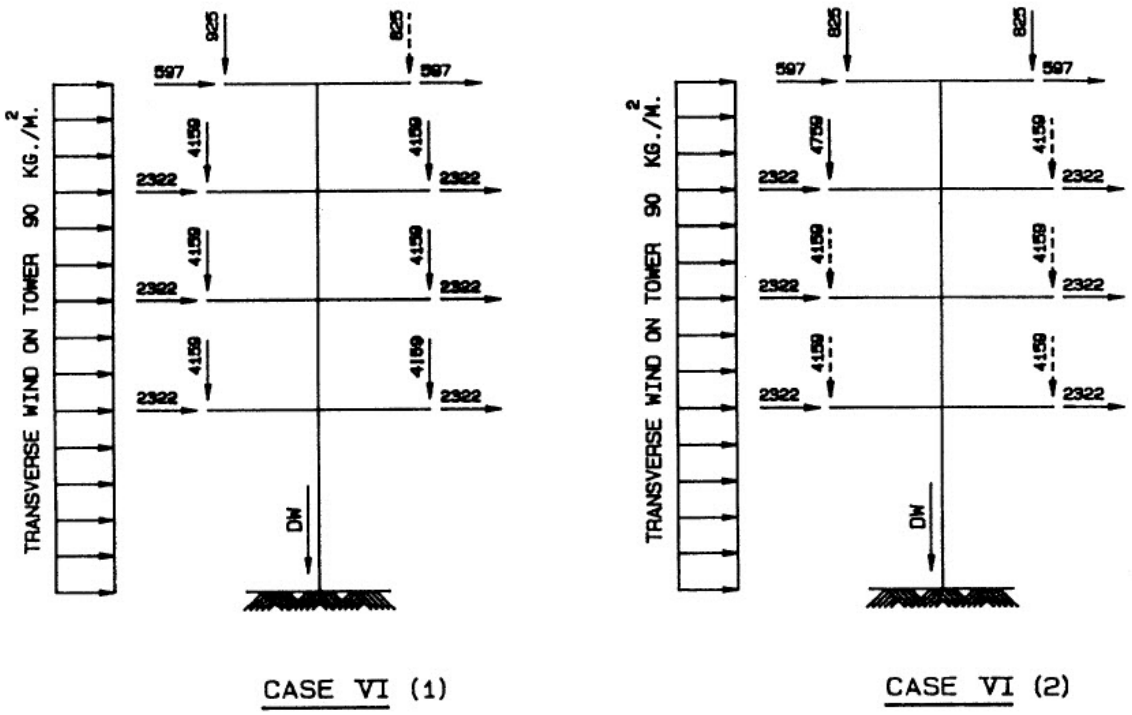


CASE IV (8, 9, 10)



CASE V (1, 2, 3)

Figure 2 (Cont.)



LOADING CASES

CASE I Extreme transverse wind, OLF. = 1.3

CASE II Extreme longitudinal wind, OLF. = 1.3

CASE III Extreme oblique wind, OLF. = 1.3

CASE IV Broken wires, OLF. = 1.1

(1) Two OHG. wires broken.
(2) One OHG. wire and any one of top conductors broken.
(3) One OHG. wire and any one of middle conductors broken.
(4) One OHG. wire and any one of bottom conductors broken.
(5) Top conductors broken.
(6) Middle conductors broken.
(7) Bottom conductors broken.
(8) Top and middle conductors on the same side broken.
(9) Top and bottom conductors on the same side broken.
(10) Middle and bottom conductors on the same side broken.

CASE V Broken insulator strings, OLF. = 1.1

(1) Any one of top insulator strings broken.
(2) Any one of middle insulator strings broken.
(3) Any one of bottom insulator strings broken.

CASE VI Maintenance, OLF. = 1.3

(1) Any one OHG. wire.
(2) Any one conductor.

Figure 2 (Cont.)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

โปรแกรมสามารถคำนวณหาแรงกระทำภายในชิ้นส่วนเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างถูกต้อง เพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงอย่างเหมาะสมได้ต่อไป

สรุป

ค่าที่ได้จากการประมวลผลจากโปรแกรม TL-TOWERA เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 ให้ผลตรงกัน แต่ทั้งนี้ในส่วนของระยะเวลาในการประมวลผลพบว่าโปรแกรม TL-TOWERA ใช้เวลามากกว่าโปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในด้านของเครื่องมือ สถานที่ และคำแนะนำในการทำการทดสอบทำให้สามารถทำการวิจัยในครั้งนี้เป็นไปอย่างราบรื่น

เอกสารอ้างอิง

นพชัย เหลืองวิทิตกูล .2534 .**การออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบประหยัด**. วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ., กรุงเทพฯ

สืบสกุล ธรรมาเสถียร .2540 .**การวิเคราะห์โครงสร้างโดยคอมพิวเตอร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต . มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

สมโพธิ์ วิวิธเกยูรวงศ์ .2550 .**การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีแมทริกซ์**. พิมพ์ครั้งที่โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ 3 มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

พร้อมเลิศ หล่อวิจิตร .2550 .**คู่มือเรียน** PHP **และ** MySQL **สำหรับผู้เริ่มต้น**. พิมพ์ครั้งที่สำนักพิมพ์โปรวิชั่น 1, กรุงเทพฯ

ศศกร สิริโยธิน .2552 .**การพัฒนาโปรแกรมต้นแบบ** TFAP-3D **โดยการใช้คอมพิวเตอร์กราฟิก**. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ., กรุงเทพฯ

American Society of Civil Engineers. 1982. Loading for Electrical Transmission Structures. **Journal of The Structural Division.** ASCE, New York

American Society of Civil Engineers. 1984. Guidelines of Transmission Line Structural Loads. ASCE, New York

American Society of Civil Engineers. 2015. Design of Latticed Steel Transmission Structures. ASCE, New York

กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบต้นทุนต่ำโดยใช้เส้นใยมะพร้าวอ่อนทดแทนแร่ใยหิน

Low Cost Fibre-Cement Flat Sheets by Young Coconut Fibers Replaced Asbestos

ประชุม คำพุฒ[1*]

Prachoom Khamput[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากรรมวิธีการผลิตแผ่นใยมะพร้าวอ่อนอัดซีเมนต์ต้นทุนต่ำสำหรับวิสาหกิจชุมชน และวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เป็นสารเชื่อมประสาน ใช้เส้นใยมะพร้าวอ่อนเป็นวัสดุเสริมแรง ใช้ทรายและหินฝุ่นเป็นมวลรวม ทำการกำหนดส่วนผสมและขึ้นรูปตัวอย่างผลิตภัณฑ์แผ่นใยอัดซีเมนต์โดยวิธีการสั่นเขย่าแบบกึ่งอัตโนมัติ ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1427-2540 เรื่องกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ ผลการทดสอบ พบว่าการใช้หินฝุ่นบดย่อยแทนทราย ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์และทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงจนสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ การผสมเส้นใยมะพร้าวอ่อนในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนาแน่น และสภาพการนำความร้อนลดลงเล็กน้อย ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : หินฝุ่นบดย่อย : เส้นใยมะพร้าวอ่อน : น้ำประปา เท่ากับ 1 : 2 : 0.095 : 0.4 โดยน้ำหนัก โดยผลิตภัณฑ์แผ่นใยมะพร้าวอ่อนอัดซีเมนต์ที่ได้มีต้นทุนต่ำและคุณสมบัติทั้งหมดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

ABSTRACT

This research aims to develop the manufacturing process of low cost cement-bonded young coconut fiberboard for communities and small and medium- sized enterprises by using Portland cement type 1 as cementitious material. Young coconut fibers were used as reinforcement material, sand and stone dusts were aggregates. Then specified the admixture formulation and formed fiberboard by semi-automatic shaking. After physical and mechanical testing according to Standard TIS.1427-2540 about standpoints cement with high dense, the result showed that crushed limestone instead of sand usage improved the strength of the product and the density could be reduced to achieve the standard. The admixing with young coconut fibers in higher doses effected to increase bending strength. The density and thermal conductivity values were decreased slightly. The appropriate ratio for the commercial usage was Portland cement type 1: grinded limestone: young coconut fiber : water as 1: 2 : 0.095 : 0.4 by weight that appeared the cement-bonded young coconut fiberboard had low cost and all properties reached the standard.

Key Words: fibre-cement flat sheets, young coconut fibers, low cost, asbestos, TIS.1427-2540

*Corresponding author; e-mail address: **prachoom.k@en.rmutt.ac.th, choomy_gtc@hotmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110

คำนำ

แร่ใยหิน (Asbestos) เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้สำหรับเส้นใยแร่ซิลิเกต (Fibrous mineral silicates) ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีลักษณะเป็นเส้นใยอยู่รวมกันเป็นมัด (Bundle) แร่ใยหินแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ แอมฟิโบลและเซอร์เพนไทน์ ซึ่งแบ่งย่อยออกเป็น 6 ชนิด แร่ใยหินมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความเหนียว ทนทานต่อแรงดึงได้สูง ทนความร้อนได้ดี และมีความทนทานต่อกรด ด่าง และสารเคมีหลายชนิดได้ดี แร่ใยหินถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแกร่ง ทนกรด ด่าง ความร้อน เช่น กระเบื้องกันความร้อน กระเบื้องมุงหลังคา ภาชนะพลาสติกบรรจุแบตเตอรี่รถยนต์ เป็นต้น แร่ใยหินแม้จะมีคุณสมบัติที่เอื้อให้เกิดประโยชน์หลายประการ แต่หากแร่นี้เข้าไปอยู่ในปอดจะสามารถก่อให้เกิดโรคที่ร้ายแรงในมนุษย์ได้ โดยโรคที่มีสาเหตุมาจากแร่ใยหิน ได้แก่ แอสเบสโตสิส (Asbestosis) มะเร็งปอด และเมโสเธลิโอมา (Mesothelioma) แม้จะเป็นที่ทราบดีเกี่ยวกับอันตรายของแร่ใยหิน และมีความพยายามที่จะควบคุมหรือหลีกเลี่ยงไม่ใช้แร่นี้ เช่น ประเทศที่พัฒนาแล้วบางประเทศได้พยายามลดการใช้และห้ามนำเข้าแร่ใยหิน ตลอดจนค้นคว้าหาสารอื่นเพื่อใช้ทดแทน (งานอาชีวอนามัย, 2559)

มะพร้าว มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Cocos nucifera Linn. เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจพืชหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากคนไทยรู้จักใช้เนื้อมะพร้าวในการบริโภคเป็นอาหารทั้งคาวและหวานในชีวิตประจำวัน ซึ่งจากสำนักงานสถิติแห่งชาติได้เคยสำรวจพบว่า ประชากรไทย 1 คน จะบริโภคเนื้อมะพร้าวประมาณปีละ 8,273.2 กรัม หรือประมาณ 18 ผล/คน/ปี ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยมีพลเมืองประมาณ 55 ล้านคน จะใช้ผลมะพร้าวประมาณ 990 ล้านผล หรือประมาณ 65% ของผลผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือประมาณ 35% ของผลผลิตทั้งหมด หรือ 489 ล้านผล ใช้ในรูปของอุตสาหกรรมหรือส่งออกต่อไป (ศูนย์ข้อมูลผลไม้, 2556) จากปริมาณผลผลิตและการบริโภคมะพร้าวที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก แสดงให้เป็นได้ว่าผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมมะพร้าวต้องมีจำนวนมากตามไปด้วย ทั้งในด้านของกะลามะพร้าว เถ้ากะลามะพร้าว ขุยมะพร้าว กากมะพร้าว และเส้นใยมะพร้าว ซึ่งส่วนมากก็สามารถนำไปใช้ได้ในทุกกระบวนการ เช่น กะลามะพร้าวใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เถ้ากะลามะพร้าวทำถ่านอัดแท่ง ขุยมะพร้าวใช้ปลูกต้นไม้ กากมะพร้าวใช้เป็นอาหารสัตว์ เส้นใยมะพร้าวใช้ทำที่นอน พรมเช็ดเท้า หรือใช้เสริมในกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบเป็นต้น แต่ยังมีขยะจากมะพร้าวที่ยังไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ หรือใช้ประโยชน์น้อยมาก คือ เส้นใยจากเปลือกมะพร้าวอ่อน ทั้ง ๆ ที่มะพร้าวอ่อนในปัจจุบันใช้ในการผลิตน้ำมะพร้าวและได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งขยะเปลือกมะพร้าวอ่อนจะเห็นอยู่ทั่วไปในแถบจังหวัดที่ปลูกมะพร้าวน้ำหอม เช่น สมุทรสาคร และราชบุรี เป็นต้น

โครงการวิจัยนี้มีความมุ่งหมายสูงสุด คือ การได้ผลิตภัณฑ์กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบที่ใช้เส้นใยมะพร้าวอ่อนเสริมแรงทดแทนแร่ใยหิน ซึ่งมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ใช้เครื่องจักรราคาถูก เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับอาคารเขียว ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เหมาะสำหรับวิสาหกิจชุมชน วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม ผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินงานประกอบด้วย 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, 2) หินฝุ่นจากโรงโม่หินจังหวัดสระบุรี นำมาบดย่อยให้มีขนาดเท่ากับทราย, 3) เส้นใยมะพร้าวอ่อนจากโรงงาน ควบคุมปริมาณ

ความชื้นไม่เกินร้อยละ 15 (Figure 1), 4) สารปรับปรุงเส้นใย ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), 5) น้ำประปา หรือน้ำสะอาด, เครื่องตัดเส้นใยมะพร้าวอ่อน (Figure 2), 7) เครื่องผสมคอนกรีต, 8) เครื่องอัดแผ่นใยมะพร้าวอัดซีเมนต์ (ดัดแปลงมาจากเครื่องอัดคอนกรีตบล็อก) (Figure 3), 9) แท่นพลิกแผ่นอัดซีเมนต์, 10) ตะแกรงสำหรับร่อนวัสดุผสม, 11) แบบหล่อขนาด 300 x 300 x 15 ลบ.มม., 12) ชุดทดสอบหาค่าความหนาแน่น ความชื้น และการดูดซึมน้ำ, 13) เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง และ 14) เครื่องทดสอบเอนกประสงค์

Figure 1 Young coconut fiber

Figure 2 Coconut fiber cutter

Figure 3 Fibre-cement flat sheets compressor

การกำหนดอัตราส่วนผสม

การดำเนินงานพัฒนากรรมวิธีการผลิตกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบต้นทุนต่ำโดยใช้เส้นใยมะพร้าวอ่อนทดแทนแร่ใยหิน ได้ทำการทดลองเบื้องต้นและขั้นกลางหลายขั้นตอนด้วยกัน เริ่มจากการทดสอบคุณสมบัติของหินฝุ่นเทียบกับทราย (ประชุม, 2549) การบดย่อยหินฝุ่นให้มีขนาดเท่ากับทราย การทดสอบผลกระทบของสารเร่งการก่อตัว 3 ชนิด (อลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$), แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$), และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)) ที่มีต่อมอร์ต้า การปรับปรุงเส้นใยด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) การหาวิธีการตัดเส้นใยมะพร้าวอ่อนที่เหมาะสม การทดลองใช้เหล็กตะแกรง 5 ขนาด เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ ซึ่งได้ข้อสรุปว่า หินฝุ่นบดย่อยสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมได้ทั้งหมด สารเร่งการก่อตัวไม่จำเป็นต่อการใช้งานเนื่องจากช่วยให้มอร์ต้าก่อตัวเร็วในขั้นต้นเท่านั้น วิธีการใช้เครื่องจักรในการบดตัดเส้นใยมะพร้าวอ่อนช่วยให้เส้นใยมะพร้าวมีขนาดคละกันดี ใช้วิธีการขึ้นรูปตัวอย่างด้วยวิธีการสั่นเขย่าแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยไม่ต้องเสริมเหล็กตะแกรงเนื่องจากแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบมีความแข็งแรงเพียงพอ ดังนั้นจึงนำมาออกแบบส่วนผสมและทำการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบในขั้นตอนสุดท้าย (Table 1)

Table 1 Ratio of Fibre-cement flat sheets (by weight)

Ratio	Cement (g)	Quarry dust (g)	Young coconut fibers (g)	Water (g)
CF.50	1,000	2,000	50	400
CF.55	1,000	2,000	55	400
CF.60	1,000	2,000	60	400
CF.65	1,000	2,000	65	400
CF.70	1,000	2,000	70	400
CF.75	1,000	2,000	75	400
CF.80	1,000	2,000	80	400
CF.85	1,000	2,000	85	400
CF.90	1,000	2,000	90	400
CF.95	1,000	2,000	95	400

การขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

ทำการเตรียมส่วนผสมตามกำหนดในตารางที่ 1 จากนั้นนำปูนซีเมนต์ หินฝุ่นบดย่อย และเส้นใยมะพร้าวอ่อนใส่ในเครื่องผสมคอนกรีต แล้วเติมน้ำประปา ผสมส่วนผสมให้เข้ากันจนสามารถใช้มือกำส่วนผสมติดกันได้ แล้วตักส่วนผสมเทลงในแบบหล่อที่ติดตั้งบนเครื่องอัดแผ่นแบบสั่นเขย่า ทำการอัดขึ้นรูปได้เป็นตัวอย่างแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ นำออกจากแบบไปบ่มในที่ร่มจนได้อายุที่ต้องการ หลังจากนั้นนำมาทดสอบสมบัติ ตามมาตรฐาน มอก.1427-2540 เรื่องกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ ประกอบด้วย ลักษณะทั่วไป, ความหนาแน่น, ความชื้น, ความต้านทานแรงดัด มอดุลัสยืดหยุ่น และสภาพการนำความร้อน (สมอ., 2540)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ลักษณะทั่วไป ความหนาแน่น ความชื้น การพองตัวเมื่อแช่น้ำ และสภาพการนำความร้อน

ลักษณะทั่วไป พบว่าทุกอัตราส่วนที่ทำการทดลอง ขอบและผิวหน้าของแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบทั้งหมดมีความเรียบและได้ฉาก ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ส่วนของความหนาแน่น ความชื้น การพองตัวเมื่อแช่น้ำ และสภาพการนำความร้อน ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 2

Table 2 Physical properties of fibre-cement flat sheets

Ratio	Density (Kg / m^3)	Moisture (percent)	Swelling (percent)	Thermal conductivity (Watts / m - Kelvin)
CF.50	1,892	7.71	0.378	0.345
CF.55	1,856	8.92	0.547	0.339
CF.60	1,836	9.49	0.862	0.326
CF.65	1,801	9.64	1.186	0.315
CF.70	1,747	9.97	1.662	0.309
CF.75	1,781	10.47	1.709	0.216
CF.80	1,703	10.64	1.768	0.211
CF.85	1,664	10.84	1.818	0.191
CF.90	1,481	11.99	1.871	0.167
CF.95	1,298	12.65	1.924	0.151

จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบพบว่าการผสมเส้นใยมะพร้าวอ่อนในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ เนื่องจากใยมะพร้าวอ่อนมีน้ำหนักเบา เมื่อใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในมอร์ต้าจึงทำให้มอร์ต้ามีความหนาแน่นลดลง อีกทั้งการบดย่อยหินฝุ่นให้มีขนาดเท่ากับทรายมาใช้ทดแทนมวลรวมทั้งหมดทำให้สามารถใส่เส้นใยมะพร้าวอ่อนเพิ่มมากขึ้นจากเดิม ผลการทดสอบความชื้นของแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบที่ผสมเส้นใยมะพร้าวอ่อนในปริมาณมากขึ้น ทำให้มีความชื้นสูงมากขึ้นตามลำดับ โดยมีค่าสูงสุดร้อยละ 12.65 เมื่อผสมปริมาณเส้นใยมะพร้าวอ่อนเท่ากับ 95 กรัม ทั้งนี้การที่ผสมเส้นใยมะพร้าวอ่อนแล้วทำให้แผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบมีความชื้นเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวอ่อนเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีรูพรุน จึงมีความสามารถในการกักเก็บความชื้นได้สูง (Pablo, 1989) แต่การนำเส้นใยมะพร้าวอ่อนไปปรับปรุงสภาพก่อนก็ช่วยลดความชื้นลงได้ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความชื้นของแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบทุกอัตราส่วน พบว่ามีค่าความชื้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ อยู่ระหว่างร้อยละ 9 ถึง 15 ผลการทดสอบการพองตัวเมื่อแช่น้ำพบว่าเมื่อผสมเส้นใยมะพร้าวอ่อนในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้การพองตัวเมื่อแช่น้ำเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากผิวหน้าของแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบยังมีช่องว่างความพรุนให้น้ำซึมเข้าไปภายใน ทำให้เส้นใยมะพร้าวอ่อนเกิดความชื้นจึงดันแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบให้พองตัวออก โดยการพองตัวเริ่มมีค่าไม่แตกต่างกันมากที่ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 70-95 กรัม เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวอ่อนที่ผสมลงไปมีการยึดเกาะกันด้วยตัวเองได้ดี ส่วนผลการทดสอบสภาพ

การนำความร้อนที่อายุ 28 วัน พบว่าการผสมเส้นใยมะพร้าวอ่อนในปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้สภาพการนำความร้อนลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากเส้นใยมะพร้าวอ่อนมีน้ำหนักเบาอีกทั้งเมื่อผสมลงในแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบจึงทำให้มีความหนาแน่นลดลง ส่งผลให้ค่าสภาพการนำความร้อนลดลงตามไปด้วย

ความต้านทานแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่น

ค่าความต้านทานแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ ทำการทดสอบโดยการรับแรงดัดวัสดุแล้วคำนวณหาค่าตาม มอก.1427-2540 ที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 3-4

Table 3 Bending resistance of Fibre-Cement Flat Sheets

Ratio	Bending resistance (MPa)			
	7 days	14 days	21 days	28 days
CF.50	3.41	6.64	7.97	9.53
CF.55	4.71	6.49	9.05	10.21
CF.60	4.93	6.81	9.61	10.81
CF.65	5.09	8.53	10.38	11.65
CF.70	5.99	10.99	11.77	12.96
CF.75	5.23	9.21	10.64	11.06
CF.80	5.05	8.59	9.16	10.84
CF.85	4.92	7.88	8.94	10.27
CF.90	4.31	6.81	8.11	9.89
CF.95	3.66	5.08	7.92	9.61

Table 4 Elastic modulus of Fibre-Cement Flat Sheets

Ratio	Elastic modulus (MPa)			
	7 days	14 days	21 days	28 days
CF.50	3,175	3,791	4,107	4,789
CF.55	3,923	5,265	5,533	5,620
CF.60	4,214	5,494	5,794	6,289
CF.65	4,370	5,752	6,842	7,189
CF.70	4,814	6,602	7,902	8,291
CF.75	3,281	6,716	7,621	8,199
CF.80	2,389	4,689	5,905	7,803
CF.85	2,240	3,719	6,899	7,401
CF.90	1,584	4,201	4,944	6,649
CF.95	2,241	4,809	5,801	6,511

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าความต้านทานแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำ และมวลรวมหินฝุ่นบดย่อยที่เสริมความแข็งแรง แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใส่เส้นใยมะพร้าวอ่อนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ความต้านทานแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ จนถึงอัตราส่วน CF.70 มีค่ามากที่สุด คือ ที่อายุการบ่ม 28 วัน ได้ความต้านทานแรงดัดเท่ากับ 12.96 เมกะพาสคัล ได้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 8,291 เมกะพาสคัล หลังจากนั้นเมื่อใส่เส้นใยมะพร้าวอ่อนเพิ่มขึ้นไปอีกเรื่อย ๆ ทำให้ความต้านทานแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลงตามลำดับ (ประชุม, 2550) จนถึงอัตราส่วน CF.95 ก็ไม่สามารถใส่เส้นใยมะพร้าวอ่อนเพิ่มได้อีกต่อไป เนื่องจากเกิดการพองตัวและส่วนผสมไม่เข้ากันจนไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้ อีกประการหนึ่งที่ทำให้สามารถใส่เส้นใยมะพร้าวอ่อนเพิ่มมากขึ้นได้กว่าเดิม คือ การบดย่อยหินฝุ่นให้มีขนาดเท่าทราย แล้วผสมเป็นมวลรวมทั้งหมดดังที่กล่าวมาแล้ว ช่วยให้เส้นใยมะพร้าวอ่อนสามารถแทรกตัวในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตได้มากขึ้น จึงส่งผลให้แผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบรับกำลังได้มากขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นลดลงเพราะปริมาณเส้นใยมะพร้าวอ่อนที่ใส่เพิ่มขึ้นได้ โดยอัตราส่วน CF.95 คือ ปูนซีเมนต์ : หินฝุ่นบดย่อย : เส้นใยมะพร้าวอ่อน : น้ำประปา เท่ากับ 1,000 : 2,000 : 95 : 400 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานแรงดัด เท่ากับ 9.61 เมกะพาสคัล และมอดุลัสยืดหยุ่น เท่ากับ 6,511 เมกะพาสคัล มีความเหมาะสมกับการนำไปผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากสามารถใส่เส้นใยมะพร้าวอ่อนได้ปริมาณมากที่สุด และมีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด ในขณะที่มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

สรุป

การวิจัยเพื่อศึกษาการนำเส้นใยมะพร้าวอ่อนไปใช้เป็นวัสดุทดแทนแร่ใยหินนั้น เพื่อต้องการทราบว่าเส้นใยมะพร้าวอ่อนสามารถผสมในแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบได้หรือไม่ และมีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ปริมาณส่วนผสมเท่าใด โดยทำการปรับปรุงส่วนผสมและกระบวนการขึ้นรูปวัสดุให้มีต้นทุนที่ต่ำลงจากการดัดแปลงเครื่องจักรในการอัดขึ้นรูป ผลการวิจัยทำให้ทราบว่า หินฝุ่นที่บดย่อยสามารถช่วยทำให้เพิ่มปริมาณการใส่เส้นใยมะพร้าวอ่อนได้ และเส้นใยมะพร้าวอ่อนสามารถใช้เสริมแรงในแผ่นกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบได้ โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์คือ ปูนซีเมนต์ 1,000 กรัม : หินฝุ่นบดย่อย 2,000 กรัม : เส้นใยมะพร้าวอ่อน 95 กรัม และน้ำประปา 400 กรัม

กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) งบประมาณประจำปี 2560

เอกสารอ้างอิง

งานอาชีวอนามัย. 2559. **แร่ใยหิน**. คณะแพทย์ศาสตร์ศิริราชพยาบาล, มหาวิทยาลัยมหิดล (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก www.si.mahidol.ac.th/th/division/ophs/admin/knowledges_files/31_34_1.doc

ประชุม คำพุฒ. 2549. การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียดผสมน้ำยาลดปริมาณน้ำ. **วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง**, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 26-33.

ประชุม คำพุฒ. 2550. การใช้เส้นใยอ้อยและเส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุเสริมแรงในแผ่นยิปซัม. **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45**, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, กรุงเทพฯ, 30 มกราคม-2 กุมภาพันธ์ 2550, เล่มที่ 5, หน้า 339-346.

ศูนย์ข้อมูลผลไม้. 2556. **มะพร้าว**. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก http://www.oae.go.th/fruits/index.php/coconut-data

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2540. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1427-2540 กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ**, กระทรวงอุตสาหกรรม.

Pablo, A.A. 1989. Wood cement boards from wood wastes and fast-growing plantation species for low-cost housing. **The Philippine Lumberman** 35: 8–53.

ผลของอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์และอัตราเวียนสารละลายเหล็กต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการแบบผสมทางเคมีและชีวภาพ

Effect of Hydrogen Sulfide Loading Rates and Iron Solution Circulation Rates on Efficiency of Hydrogen Sulfide Removal from Biogas by Hybrid Chemical and Biological Process

จารุกร ดวงแก้ว[1] และ ปฏิรูป ผลจันทร์[2*]

Jarukon Duangkaew[1] and Patiroop Pholchan[2*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์ และอัตราเวียนสารละลายเหล็กต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยกระบวนการผสมทางเคมีและชีวภาพ ถังปฏิกรณ์ชีวภาพบรรจุถ่านกัมมันต์ที่ตรึงเชื้อ *Acidithiobacillus ferrooxidans* MM161 ลงบนตัวกลาง ผลการทดลองพบว่าอัตราภาระบรรทุก และอัตราเวียนสารละลายเหล็กมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบผลที่มีต่อกันของปัจจัยทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญด้วย ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด (94%) พบที่ค่าอัตราภาระบรรทุก 0.0001 g-H_2S/l/min และอัตราเวียนสารละลายเหล็ก 0.048 l/min นอกจากนี้ยังพบว่าเชื้อ *Acidithiobacillus ferrooxidans* MM161 ยังคงเป็นเชื้อหลักหลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 14 วัน แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของกระบวนการในการรักษาเชื้อและมีเสถียรภาพสูงในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ABSTRACT

This work aimed to study effects of H_2S loading rates and iron solution recirculation rates on H_2S removal efficiency by the hybrid chemical-biological process. The biological reactor was filled with the activated carbon with immobilized *Acidithiobacillus ferrooxidans* MM161. Results showed that H_2S loading rates and iron solution recirculation rates significantly affected H_2S removal efficiency. Significant interaction effect of both factors was also found. The highest H_2S removal efficiency (94%) was achieved at H_2S loading and iron solution recirculation rates of 0.0001 g-H_2S/l/min and 0.048 l/min. *Acidithiobacillus ferrooxidans* MM161 was still dominant in the system after 14 d operation which revealed capability of the system in retaining required microorganism potentially leading to high stability in H_2S removal.

Key Words: H_2S, Biogas, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, Full factorial design

*Corresponding author; e-mail address: **patiroop@eng.cmu.ac.th**

[1]บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

[1]Graduate School, Chiang Mai University 239, Huai Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200

[2]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

[2]Dept of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University 239 Huay Kaew Rd., Muang District, Chiang Mai, Thailand 50200

คำนำ

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ที่ปนเปื้อนอยู่ในก๊าซชีวภาพส่งผลเสียต่อการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพเนื่องจากลักษณะสมบัติของการกัดกร่อน (Ho, et al. 2013) การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำได้หลายวิธี เช่น การกำจัดด้วยวิธีการดักจับด้วยสารเคมี (ปกรณ์ 2009) การดูดซับทางกายภาพ (Belmabkhout, Weireld, and Sayari 2009) การบำบัดด้วยไฟฟ้าเคมี (Chang and Tseng 1996) การกรองแบบชีวภาพ (Duan, et al. 2007; Ho, et al. 2008) เป็นต้น โดยวิธีการทางกายภาพและเคมีเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดสูง แต่การเดินระบบมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้วิธีการทางชีวภาพถึงแม้จะมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงและมีประสิทธิภาพที่ดี โดยสามารถเปลี่ยนรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้ไปอยู่ในรูปของซัลเฟตได้โดยตรง แต่เมื่อมีการสะสมของซัลเฟตในระบบมากขึ้น ทำให้พีเอชของระบบลดลงเกิดเป็นผลเสียกับระบบ (Lee, et al. 2006) ดังนั้นวิธีการทางชีวภาพจึงเหมาะกับการใช้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นต่ำๆ (10-15 ppm_v) เพื่อป้องกันการลดลงของพีเอชที่เร็วเกินไป (Gabriel and Deshusses 2003)

จากข้อเสียของวิธีการทางเคมีและชีวภาพที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้มีการเริ่มศึกษาและพัฒนาถังปฏิกรณ์แบบผสมระหว่างทางเคมีและชีวภาพ (Chung 2006; Ho, et al. 2013; Lin, Chen, and Tseng 2013) หลักการคือการใช้กระบวนการทางเคมีซึ่งมีประสิทธิภาพสูงเป็นหลักในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ Fe^{3+} เป็นตัวออกซิไดซ์ ทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ให้เปลี่ยนรูปเป็นกำมะถัน (S^0) โดย Fe^{3+} จะถูกเปลี่ยนรูปเป็น Fe^{2+} จากนั้นจะใช้กระบวนการทางชีวภาพในการทำหน้าที่เปลี่ยนรูปเหล็กจาก Fe^{2+} กลับไปเป็น Fe^{3+} ให้สามารถเวียนกลับไปทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการทางเคมีได้อีกครั้ง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาถึงผลของอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์และอัตราเวียนสารละลายเหล็ก ต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของถังปฏิกรณ์แบบผสมทางเคมีและชีวภาพที่ใช้เชื้อ *Acidithiobacillus ferrooxidans* กับก๊าซชีวภาพจริงที่ได้จากบ่อหมักก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ ของฟาร์มเลี้ยงไก่บริษัทอาร์พีเอ็มฟาร์มแอนด์ฟีด จำกัด อ.สันป่าตอง จ.เชียงใหม่

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์และอัตราเวียนสารละลายเหล็กต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถังปฏิกรณ์แบบผสมทางเคมีและชีวภาพ

ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์เคมีและอัตราเวียนกลับสารละลายเหล็ก ที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถังปฏิกรณ์แบบผสมระหว่างทางเคมีและชีวภาพตามทฤษฎี Full Factorial Design แบบ 2 ระดับ โดยใช้โปรแกรม MINITAB16 (Minitab Inc.) เพื่อทราบผลของปัจจัยหลัก (Main effects) และผลที่มีต่อกันของปัจจัย (Interaction effects) โดยแต่ละปัจจัยได้ถูกกำหนดให้มีค่าสูงและต่ำ และทำการศึกษาที่ค่ากลางซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้เกิดสภาวะการทดลองดัง Table 1 ในแต่ละสภาวะของการทดลอง ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 14 วัน ทั้งนี้ในการปรับ

ค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟล์ใช้วิธีการปรับค่าอัตราไหลของก๊าซชีวภาพตามปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟล์ในก๊าซชีวภาพที่เข้าสู่ระบบในแต่ละวัน

Table 1 Experimental conditions according to the full factorial design

Experimental sequence	Hydrogen sulfide loading rate (g-H_2S/l/min)	Circulation rate (l/min)
1	0.0001	0.012
2	0.001	0.012
3	0.0001	0.048
4	0.001	0.048
5	0.00055	0.030
6	0.00055	0.030

เชื้อจุลินทรีย์และการเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองใช้เชื้อจุลินทรีย์ *Acidithiobacillus ferrooxidans* ในการเปลี่ยนรูป Fe^{2+} ให้กลายเป็น Fe^{3+} โดย *A. ferrooxidans* MM161 เป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้จากตัวอย่างดินจากเหมืองถ่านหินแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (ธิศวรรณ สมศักดิ์ และ สกุณณี บวรสมบัติ 2017) การตรึงเชื้อเริ่มต้นลงบนตัวกลาง (ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด) ทำโดยเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ *A. ferrooxidans* MM161 ในตัวกลาง K9 medium (Silverman and Lundgren 1959) เป็นเวลา 7 วัน วัดค่า Optical Density (OD) เพื่อหาปริมาณของเชื้อ ให้ได้ค่า OD = 1 จะได้ปริมาณเชื้อประมาณ 10^6 CFU/ml (ธิศวรรณ สมศักดิ์ และ สกุณณี บวรสมบัติ 2017) หลังจากนั้นนำมาผสมกับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด แช่ไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำไปบรรจุลงถังปฏิกรณ์ ตลอดระยะการเลี้ยงเชื้อจะมีการเติมอากาศผ่านกระดาษกรองขนาด 0.2 ไมโครเมตร เพื่อไม่ให้มีการปนเปื้อนของเชื้อจากภายนอก

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์เคมีเป็นถังรูปทรงกระบอกทำจากสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 cm. สูง 50 cm. ภายในบรรจุตัวกลางพลาสติกปริมาตร 4 l. ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเป็นถังเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm. สูง 80 cm. บรรจุถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดปริมาณ 40 l. ที่ตรึงเชื้อ *A.ferrooxidans* MM161 แล้ว ถังตกตะกอนซัลเฟอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm. ลึก 20 cm. โดยในถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีการเติมอากาศผ่านกระดาษกรองขนาด 0.2 ไมโครเมตร ในปริมาณ 1 l./min ภายในระบบใช้ 9K medium เป็นสารละลายเหล็กหมุนเวียนภายในระบบ โดยใน 9K medium มีความเข้มข้นของเหล็ก 8.882 g/l. รายละเอียดของอุปกรณ์และรูปภาพติดตั้งระบบ แสดงใน **Figure 1**

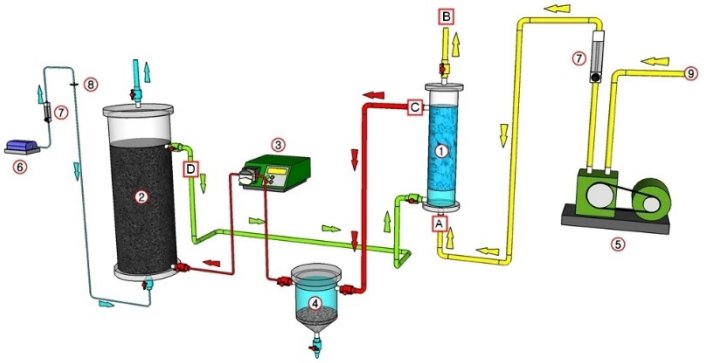


Figure 1 Hybrid chemical and biological process reactor: (1) Chemical reactor, (2) Biological reactor, (3) Peristaltic pump, (4) Sulfur sedimentation tank, (5) Biogas pump, (6) Air pump, (7) Rotameter, (8) Air filter, (9) Influenced biogas, (A-D) Sampling points

ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง

ในการวิจัยนี้ได้ใช้ก๊าซชีวภาพจริงที่ได้จากบ่อหมักก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ ของฟาร์มเลี้ยงไก่ไข่ บริษัท อาร์ พี เอ็ม ฟาร์มแอนด์ฟีด จำกัด อ.สันป่าตอง จ.เชียงใหม่ โดยมีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในช่วง 1,171 ถึง 4,423 ppm_v

การดำเนินการทดลอง

การทดลองเริ่มจากการบรรจุถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการตรึงเชื้อแล้ว ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพให้มีปริมาตรเท่ากับ 40 l. จากนั้นเติมอาหารเลี้ยงเชื้อ 9K medium เข้าไปในระบบให้เต็มถังปฏิกรณ์ เริ่มเดินระบบโดยการสูบก๊าซชีวภาพเข้าสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์เคมีและออกด้านบนเพื่อให้ Fe^{3+} ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ ทำการตกตะกอนซัลเฟอร์ในถังตกตะกอน การเวียนกลับสารละลายเหล็กใช้เครื่องสูบแบบรีดสาย สูบสารละลายเหล็กจากถังตกตะกอนซัลเฟอร์เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพโดยอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์และอัตราเวียนกลับสารละลายเหล็กให้เป็นไปตามลำดับสภาวะการทดลองตาม Table 1

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เก็บตัวอย่างโดยใช้ถุงเก็บก๊าซชีวภาพก่อนเข้าถังปฏิกรณ์เคมีและหลังจากผ่านถังปฏิกรณ์เคมีที่จุด A และ B ตามลำดับ (Figure 1) นำมาวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพแบบพกพา Geotech รุ่น Biogas 5000 เพื่อเปรียบเทียบและคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของระบบ การวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ *A.ferrooxidans* MM161 ทำการเก็บตัวอย่างจากถ่านกัมมันต์จากภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพหมายเลข 2 โดยใช้เทคนิค Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE)

ผลการทดลอง

ผลของค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์และอัตราเวียนสารละลายเหล็ก

จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของผลการทดลองโดยโปรแกรม MINITAB16 (Table 2 และ Figure 2(a)) พบว่าค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์และอัตราเวียนสารละลายเหล็กมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P=0.021และ0.028 ตามลำดับ) โดยพบว่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟล์มีระดับของผลกระทบสูงกว่าค่าอัตราเวียนสารละลายเหล็ก (-42.50 และ 32.50 ตามลำดับ) ทั้งนี้ค่าที่ติดลบของระดับผลกระทบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟล์ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่าลดลง ในขณะที่อัตราเวียนสารละลายเหล็กที่สูงขึ้นส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 2 ปัจจัยมีผลต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ (P=0.037) โดยเมื่อใช้ค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟล์ต่ำประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีค่าสูงกว่าเมื่อค่าอัตราเวียนสารละลายเหล็กที่ใช้มีค่าสูง (Figure 2(b))

จากผลการทดลองที่ได้ (Figure 2(c)) ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด (94%) เกิดขึ้นที่ค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 0.0001 g-H_2S/l/min และอัตราเวียนสารละลายเหล็กเท่ากับ 48 l/min และประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำสุด (19%) พบที่ค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 0.0010 g-H_2S/l/min และอัตราเวียนสารละลายเหล็กเท่ากับ 12 l/min ตามลำดับ ทั้งนี้สามารถสร้างสมการสำหรับการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดัง Equation 2.1 (การใช้สมการต้องแทนค่าที่เป็น Coded Value) โดยสมการที่ได้มีค่า R^2(adjusted)=99.75% ซึ่งถือว่ามีค่าสูงมากสำหรับการนำไปใช้ในการทำนายผล(Hu and Bentler 1999)

$$\%H_2S \text{ Removal} = 44.25 - 21.25(X) + 16.25(Y) - 12.25(X)(Y) \qquad \text{Equation 2.1}$$

ให้ X = H_2S Loading, (g-H_2S/l/min)

Y = Circulation Rate, (l/min)

Table 2 Estimated effects and coefficients for H_2S removal

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		44.25	0.7071	62.58	0.010
H_2S Loading, (g-H_2S/l/min)	-42.50	-21.25	0.7071	-30.05	0.021
Circulation Rate, (l/min)	32.50	16.25	0.7071	22.98	0.028
H_2S Loading, g-H_2S/l/min * Circulation Rate, (l/min)	-24.50	-12.25	0.7071	-17.32	0.037
Ct Pt		-20.25	1.2247	-16.53	0.038
S=1.41421	R-Sq=99.95%		R-Sq(adj)=99.75%		

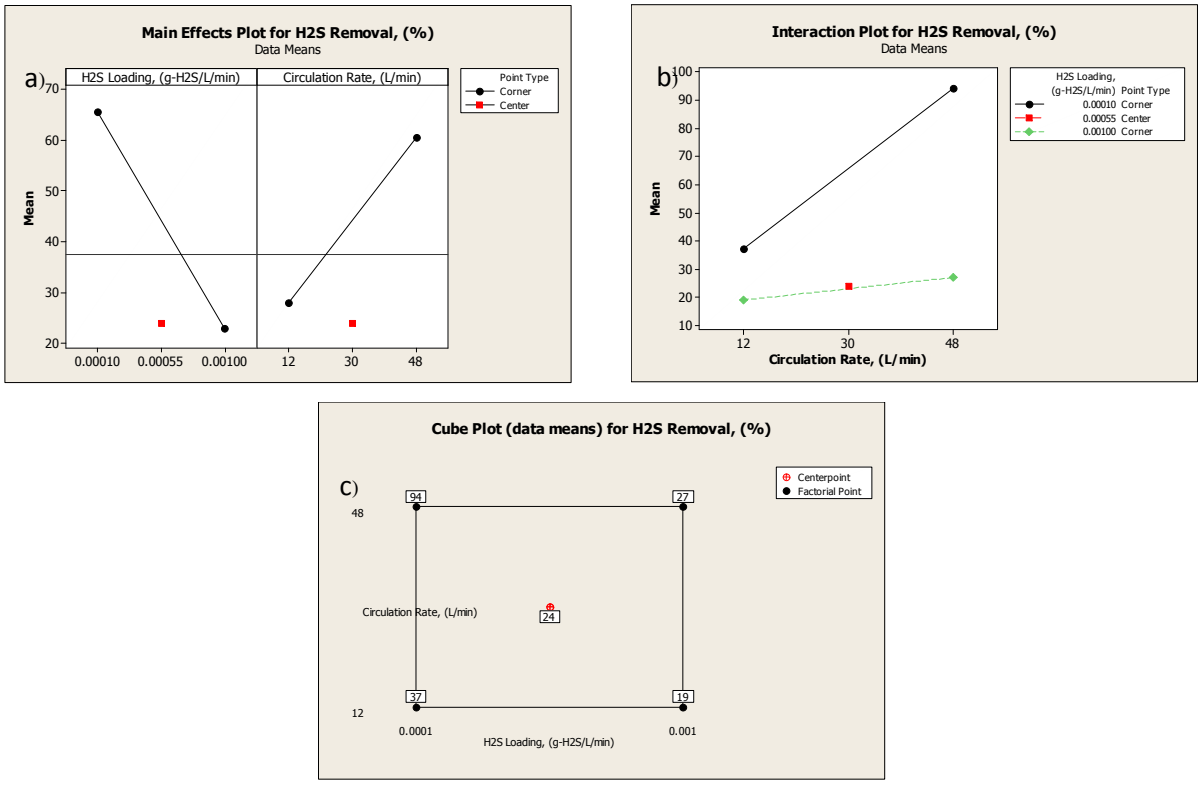


Figure 2 Effect of factors on hydrogen sulfide removal efficiency: a) Main effects plot, b) Interaction effects plot, c) Cube plot

ผลการวิเคราะห์เชื้อ *A.ferrooxidans* MM161 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

การวิเคราะห์เชื้อ *A. ferrooxidans* MM161 จากตัวอย่างที่เก็บในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ หลังจากเดินระบบเสร็จสิ้น โดยใช้เทคนิค DGGE เปรียบเทียบกับเชื้อมาตรฐาน *A.ferrooxidans* DSM11477 และเชื้อบริสุทธิ์ *A.ferrooxidans* MM161 แสดงใน Figure 3 โดยเป็นตัวอย่างจากการทดลองลำดับที่ 3 พบว่าเชื้อทุกตัวมีตำแหน่งแถบตรงกัน แสดงให้เห็นว่าเชื้อจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพส่วนใหญ่ยังคงเป็นเชื้อ *A. ferrooxidans* MM161 โดยไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อชนิดอื่นจากภายนอก(ธิศวรรณ สมศักดิ์ 2017)

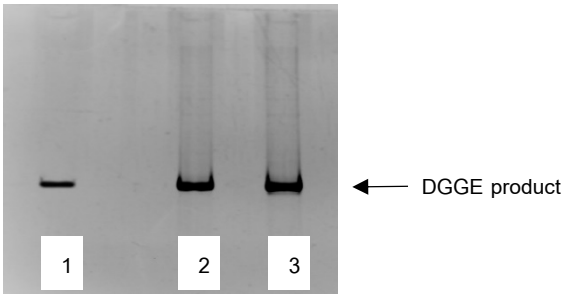


Figure 3 DGGE product: (1) Standard *A.ferrooxidans* DSM11477, (2) Pure *A.ferrooxidans* MM161, (3) Bioreactor sample in experimental sequence 3

วิจารณ์ผลการทดลอง

อัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์และอัตราเวียนสารละลายเหล็กมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยปัจจัยทั้งสองนี้มีผลต่อกันคือ ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่สูงจะพบเมื่อใช้ค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำในขณะที่ค่าอัตราเวียนสารละลายเหล็กต้องมีค่าสูง สิ่งที่พบจากการทดลองสอดคล้องกับหลักการของการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ดังแสดงใน Equation 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกกำจัดขึ้นกับปริมาณของ Fe^{+3} (ในรูปของเฟอร์ริกซัลเฟต) ที่เวียนกลับมาจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพ หากปริมาณ Fe^{+3} มีไม่พอเพียงกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์เคมี ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีค่าต่ำ

$$H_2S + Fe_2(SO_4)_3 \longrightarrow S + 2FeSO_4 + H_2SO_4 \qquad \text{Equation 2.2}$$

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับหลักการดังกล่าว โดยค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง โดยที่ค่าอัตราเวียนสารละลายเหล็กสูงสุดที่ใช้ (0.048 l/min) เมื่อค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.0001 g-H_2S/l/min เป็น 0.0010 g-H_2S/l/min ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงจาก 94% เหลือ 27% สอดคล้องกับผลที่รายงานในการทดลองของ (Lin, Chen, and Tseng 2013) ที่การเพิ่มค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์จาก 0.0011 g-H_2S/l/min เป็น 0.0069 g-H_2S/l/min ส่งผลให้การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงจาก 95% เหลือ 65% และจากการศึกษาของ (Ho, et al. 2013) เมื่อเพิ่มค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์จาก 0.00015 g-H_2S/l/min เป็น 0.0015 g-H_2S/l/min ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงจาก 100% เหลือเพียง 15% เท่านั้น Table 3 แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดที่ได้ในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงเดียวกับที่พบในงานวิจัยอื่น ๆ

Table 3 Comparisons of H_2S removal efficiencies from different studies

	(Lin, Chen, and Tseng 2013)		(Ho, et al. 2013)		This Experimental	
H_2S Loading, (g-H_2S/l/min)	0.0011	0.0069	0.00015	0.0015	0.0001	0.0010
%H_2S Removal	95	65	100	15	94	27

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระบบรับได้ พบว่าค่าที่ได้ในงานวิจัยนี้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการที่ค่าพีเอชของสารอาหารในระบบมีค่าค่อนข้างสูง (2.87-3.85) เมื่อเทียบกับค่าที่ใช้ในการศึกษาอื่นๆ โดย (Ho, et al. 2013) ควบคุมค่าพีเอชของสารอาหารในระบบให้อยู่ในช่วง 1.7-1.9 ซึ่งช่วงค่าพีเอชดังกล่าวเป็นช่วงค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจุลชีพในกลุ่ม *Acidithiobacillus ferrooxidans* ที่ทำงานในระบบ การที่ช่วงค่าพีเอชของสารอาหารในระบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าค่อนข้างสูงนอกจากจะส่งผลให้การอัตราการทำงานของจุลชีพในระบบมีค่าต่ำแล้ว ยังมีผลต่อการเปลี่ยนรูปของ Fe^{+2} ไปเป็น Fe^{+3} ดังแสดงใน

Equation 2.3 ทั้งนี้ ในการดำเนินงานวิจัยในส่วนต่อไป ผู้วิจัยจะได้ดำเนินการควบคุมค่าพีเอชของสารอาหารในระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เพื่อพิสูจน์สมมติฐานของผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพของระบบต่อไป

$$2Fe^{2+} + 1/2O_2(l) + H_2O \longrightarrow 2Fe^{3+} + 2OH^- \qquad \text{Equation 2.3}$$

จากผลการตรวจสอบชนิดของจุลชีพที่พบภายหลังการเดินระบบเป็นระยะเวลา 14 วัน ของแต่ละการทดลองพบว่ารูปแบบกระบวนการที่ใช้มีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเชื้อ *A. ferrooxidans* MM161 โดยสามารถเดินระบบได้โดยมีการปนเปื้อนของเชื้ออื่นๆน้อย ซึ่งเป็นข้อดีของกระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยเชื้อในกลุ่ม *A. Ferrooxidans* เนื่องจากต้องเดินระบบที่ช่วงค่าพีเอชต่ำ ส่งผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อกลุ่มอื่นๆ ซึ่งข้อดีดังกล่าวทำให้กระบวนการแบบเคมี-ชีวภาพที่ใช้มีเสถียรภาพที่สูงกว่ากระบวนการชีวภาพที่ใช้เชื้อบริสุทธิ์เช่นที่ใช้ในถังกรองชีวภาพ (Cho, Hirai, and Shoda 1991; Hirai, et al. 2001; Martin, et al. 2002)

สรุป

อัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ต่ำ และอัตราเวียนสารละลายเหล็กที่สูง ทำให้กระบวนการแบบผสมระหว่างทางเคมีและชีวภาพ มีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่สูง โดยประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ คือ 94% ที่ค่าอัตราภาระบรรทุกไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 0.0001 g-H_2S/l/min และอัตราเวียนสารละลายเหล็ก เท่ากับ 0.048 l/min

กระบวนการเคมี-ชีวภาพที่ใช้สามารถรักษาชนิดและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ในกลุ่ม *A. Ferrooxidans* MM161ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการมีเสถียรภาพที่สูงในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถังปฏิกรณ์

เอกสารอ้างอิง

ธิศวรรณ สมศักดิ์. 2017. **การติดตามตรวจสอบ *Acidithiobacillus Ferrooxidans* ที่สามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในถังปฏิกรณ์ชีวภาพในกระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์**. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ธิศวรรณ สมศักดิ์ และ สกุณณี บวรสมบัติ. 2017. การคัดแยก, **การระบุชนิด และการออกซิเดชั่นเหล็กเฟอรัสของ *Acidithiobacillus Ferrooxidans***

ปกรณ์ ถนอมพงษ์ชาติ. 2009. **การแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพโดยการดูดซับด้วยของเหลวในคอลัมน์อัดตัว**. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Belmabkhout, Youssef, Guy De Weireld, and Abdelhamid Sayari. 2009. **Amine-Bearing Mesoporous Silica for Co_2 and H_2S Removal from Natural Gas and Biogas.**

Chang, Moo Been, and Tian Deng Tseng. 1996. **Gas-Phase Removal of H_2S and Nh_3 with Dielectric Barrier Discharges.**

Cho, K., M. Hirai, and M. Shoda. 1991. **Degradation Characteristics of Hydrogen Sulfide, Metanethiol, Dimethyl Sulfide by *Thiobacillusthioparus* DW44 Isolated from Peat Biofilter.** J Ferment Bioeng, no. 71: 384-389.

Chung, Ying-Chien. 2006. **Treatment of High H_2S Concentrations by Chemical Absorption and Biological Oxidation Process**

Duan, Huiqi, et al. 2007. **Combined Effect of Adsorption and Biodegradation of Biological Activated Carbon on H_2S Biotrickling Filtration.** Chemosphere 66, no. 9 (1//): 1684-1691.

Gabriel, David, and Marc A. Deshusses. 2003. **Retrofitting Existing Chemical Scrubbers to Biotrickling Filters for H_2S Emission Control.**

Hirai, M., et al. 2001. **Comparison of the Biological Nh_3 Removal Characteristics among Four Inorganic Packing Materials.** J Biosci Bioeng, no. 91(4): 396-402.

Ho, Kuo-Ling, et al. 2008. **Microbial Populations Analysis and Field Application of Biofilter for the Removal of Volatile-Sulfur Compounds from Swine Wastewater Treatment System.** Journal of Hazardous Materials 152, no. 2 (4/1/): 580-588.

Ho, Kuo-Ling, et al. 2013. **Elimination of High Concentration Hydrogen Sulfide and Biogas Purification by Chemical–Biological Process.** Chemosphere 92, no. 10 (8//): 1396-1401.

Hu, Li-tze, and Peter M. Bentler. 1999. **Cutoff Criteria for Fit Indexes in Covariance Structure Analysis: Conventional Criteria Versus New Alternatives.**

Lee, Eun Young, et al. 2006. **Removal of Hydrogen Sulfide by Sulfate-Resistant *Acidithiobacillus Thiooxidans* AZ11.** Journal of Bioscience and Bioengineering 101, no. 4 (4//): 309-314.

Lin, Wei-Chih, Yu-Pei Chen, and Ching-Ping Tseng. 2013. **Pilot-Scale Chemical–Biological System for Efficient H2s Removal from Biogas.** Bioresource Technology 135, no. 0 (5//): 283-291.

Martin, RW Jr, et al. 2002. **Optimization of Biofiltration for Odour Control: Model Calibration, Validation, and Applications.** Water Environ Res, no. 74(1): 17-27.

Silverman, M. P., and D. G. Lundgren. 1959. ***Studies on the Chemoautotrophic Iron Bacteriumferrobacillus Ferrooxidans Ii.* Manometric Studies**: Journal of Bacteriology.

การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารยับยั้ง

Corrosion of Reinforcement in Concrete mixed with Corrosion Inhibitors

เมทิดา แก้วพันธ์[1*] และ วันชัย ยอดสุดใจ[1]

Methida Kaewpan[1*] and Wanchai Yodsudjai[1]

บทคัดย่อ

ความเสียหายจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตที่เกิดขึ้นนอกจากจะทำให้หน้าตัดเหล็กเสริมลดลงแล้ว ปริมาตรของสนิมที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดแรงดันภายในดันให้คอนกรีตเกิดความเสียหายในรูปแบบต่าง ๆ เช่น แตกร้าว หลุดร่อนหรือแม้กระทั่งอาจเป็นสาเหตุให้โครงสร้างถึงขั้นวิบัติ ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนที่จะทำให้โครงสร้างมีการใช้งานที่ยาวนานขึ้น งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของสารยับยั้งในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งจะมีทั้งชนิดที่ผสมเพิ่มและชนิดทาที่ผิวของคอนกรีต โดยประยุกต์ใช้กับคอนกรีตที่ใช้ในงานทั่วไป ทำการทดสอบ 3 วิธี คือ การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตด้วยวิธีเร่งโดยวิธีเปียกสลับแห้งเฉพาะผิวบนคอนกรีต วิธีที่ 2 การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตด้วยวิธีเร่งแบบเปียกสลับแห้ง และวิธีที่ 3 การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตด้วยวิธีเร่งโดยไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาของการเกิดกัดกร่อนของคอนกรีตใช้กับประเภทที่เพิ่มสารยับยั้งนานกว่าที่ไม่มีสารยับยั้ง แต่สำหรับสารยับยั้งประเภททาเคลือบผิวด้านนอกนั้นได้ผลการทดสอบที่แตกต่างกัน

ABSTRACT

Damages from reinforced steel inside the concrete corrosion are not only decreasing the section of reinforced steel but the increased volume of rust also contributes internal pressure that would make concrete damage in various forms such as rupture, peeling, or even lead to be a cause of critical structure. Therefore, the corrosion protection is required in order to extend structure lifetime. This research study examined on the efficiency of corrosion inhibitor for reinforced steel concrete, namely, Mix-Up Type and Apply-On Concrete Surface Type. By applying with the general-use of concrete, three tests were conducted: (1) corrosion test of reinforced steel inside the concrete by wet-dry cycles acceleration exclusively on concrete surface, (2) corrosion test of reinforced steel inside the concrete by wet-dry cycles acceleration, and (3) corrosion test of reinforced steel inside the concrete by electrical acceleration. The findings revealed that concrete applied with corrosion inhibitor would have the corrosion duration slower than without corrosion inhibitor used. However, Apply-on the Surface Type corrosion inhibitor indicated the different result.

Key Words: Reinforced concrete, Half-cell potential, Corrosion inhibitor

*Corresponding author; e-mail address: **methida_may@hotmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Engineering in Infrastructure Engineering and Management, Faculty of Engineer, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในประเทศไทยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างหลักที่ใช้ในการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างแทบทุกประเภทจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความคงทนแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักได้สูง อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานานมักพบการเสื่อมสภาพเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ปัญหาที่มีความสำคัญที่ส่งผลต่อความปลอดภัย และความสามารถใช้งานได้ของโครงสร้าง การป้องกันซึ่งความเสียหายนี้ครั้งแต่ในระยะแรกของการก่อสร้างสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานและความปลอดภัยของโครงสร้างได้ และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาโครงสร้างในระยะยาวได้

การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ถือว่ายังไม่แพร่หลายมากนักในประเทศไทย ทั้งในการป้องกันโครงสร้างใหม่ที่มีโอกาสการกัดกร่อนสูง และในการซ่อมแซมโครงสร้างเก่าที่มีความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนแล้ว ในปัจจุบันสารยับยั้งการกัดกร่อนมีหลายรูปแบบตามวิธีการใช้งาน ทั้งประเภทที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่มในคอนกรีต ประเภททาเคลือบผิวเหล็กเสริมและประเภททาเคลือบผิวคอนกรีต โดยคุณสมบัติหลักของสารยับยั้งการกัดกร่อนได้แก่ สารยับยั้งการกัดกร่อนประเภทแอโนด(Corrosion Inhibitor Impregnation) สารยับยั้งการกัดกร่อนประเภทแคโทด(Anti-Rust Powder) และสารยับยั้งการกัดกร่อนประเภทผสมทั้งแอโนดและแคโทด(Corrosion Mix Inhibitor) โดยผลกระทบหลักมีตั้งแต่การลดอัตราการกัดกร่อน จนถึงการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีต

ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดต่างๆ เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด

วิธีดำเนินการศึกษา

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, สารยับยั้งการกัดกร่อน 3 ชนิด คือชนิดที่ 1 ประเภทผสมเพิ่มในคอนกรีตทั้งแอโนดและแคโทด(Corrosion Mix Inhibitor) ชนิดที่ 2 ประเภทผสมเพิ่มในคอนกรีตชนิดแอโนด(Anti-Rust Powder) และชนิดที่ 3 ประเภททาเคลือบที่ผิวของคอนกรีต(Corrosion Inhibitor impregnation)

2. สัดส่วนผสม

สำหรับส่วนผสมจะใช้คอนกรีตกำลังอัดประลัย 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่อายุ 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.63 ปริมาณปูนซีเมนต์ 354 กิโลกรัม ปริมาณมวลหยาบ 724 กิโลกรัม ปริมาณมวลรวมละเอียด 898 กิโลกรัม ปริมาณน้ำที่ใช้ 223 ลูกบาศก์เมตรต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตรโดยปริมาณสารยับยั้งดังตารางที่ 1

Table 1 Ratio of Inhibitor Used

No	Inhibitor Type	Cement (Kg)	Stone (Kg)	Sand (Kg)	Water (m^3)	Inhibitors (m^3)
1	Concrete	354	724	898	223	-
2	Corrosion Mix Inhibitor	354	724	898	223	12
3	Anti Rust Powder	354	724	898	223	5
4	Corrosion Inhibitor impregnation	354	724	898	223	Impregnateon

3. การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตด้วยวิธีเร่งโดยวิธีเปียกสลับแห้งเฉพาะผิวบนคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM G109-99a (ASTM G109-99a, 1997)

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 11.5x28x15 เซนติเมตร เสริมเหล็กกลมขนาด 12 มิลมิเมตร เคลือบด้วยอีพอกซี่และเทปพันสายไฟ ข้างละ 5 เซนติเมตร บ่มด้วยความชื้นที่เวลา 28 วัน นำมาต่อเข้ากับตัวต้านทาน 100 โอห์ม ทำการติดตั้งอุปกรณ์ขนาด 75x75x150 มิลลิเมตร สำหรับขังสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รูปที่ 1

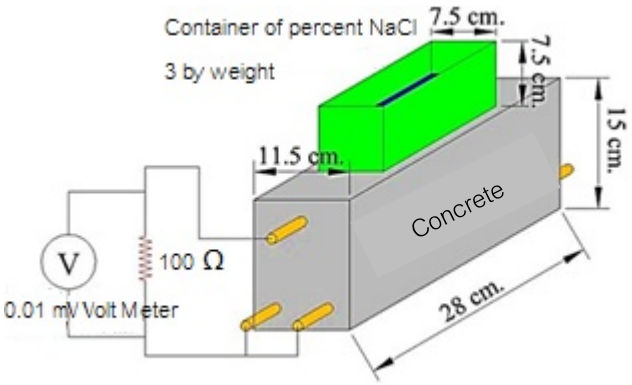


Figure 1 Corrosion Test of Reinforced Steel inside the Concrete regarding ASTM G109-99a

ให้ก้อนตัวอย่างเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้งสลับไปมา เท่ากับ 5 วัน: 2 วัน ระยะเวลาวัฏจักรเปียกผ่านไป 24 ชั่วโมง เข้าสู่วัฐจักรแห้ง จึงทำการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และวัดค่าศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทาน 100 โอห์ม ด้วยมัลติมิเตอร์ที่มีความละเอียดในการวัดถึง 0.01 มิลลิโวลต์ โดยผลที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ เรานำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในหน่วยไมโครแอมป์ต่อตารางเมตร ตามสมการ 1 และ 2

$$I = \frac{(V/1000)}{R} \quad (1)$$

$$Current\ density = \frac{I}{A} \quad (2)$$

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมป์)

V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลล์)

R คือ ค่าวามต้านทานไฟฟ้าในที่นี้เท่ากับ 100 โอห์ม

A คือ พื้นที่ผิวเหล็กเสริม (ตารางเมตร)

Current Density คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมเปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

ค่าที่ได้จากการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ทดสอบนำมาประเมินการกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยใช้ $Cu/CuSO_4$ เป็นตัวอ้างอิงในการทดสอบ

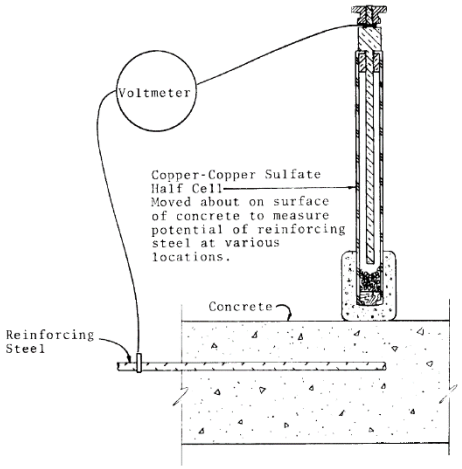


Figure 2 Demonstration of Half Cell Potential Measurement Method

4. การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตด้วยวิธีเร่งแบบเปียกสลับแห้ง

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 11.5x28x15 เซนติเมตร เสริมเหล็กกลมขนาด 12 มิลมิเมตร เคลือบด้วยอีพอกซี่และเทปพันสายไฟ ข้างละ 5 เซนติเมตร บ่มด้วยความชื้นที่เวลา 28 วัน แล้วทดสอบแนวโน้มการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กมาแช่ในอ่างของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทิ้งด้านนอกเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ทำซ้ำกันทั้งหมด 20 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 3 การทดสอบแนวโน้มการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์อีกครั้งการทดสอบแนวโน้มการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์อีกครั้ง

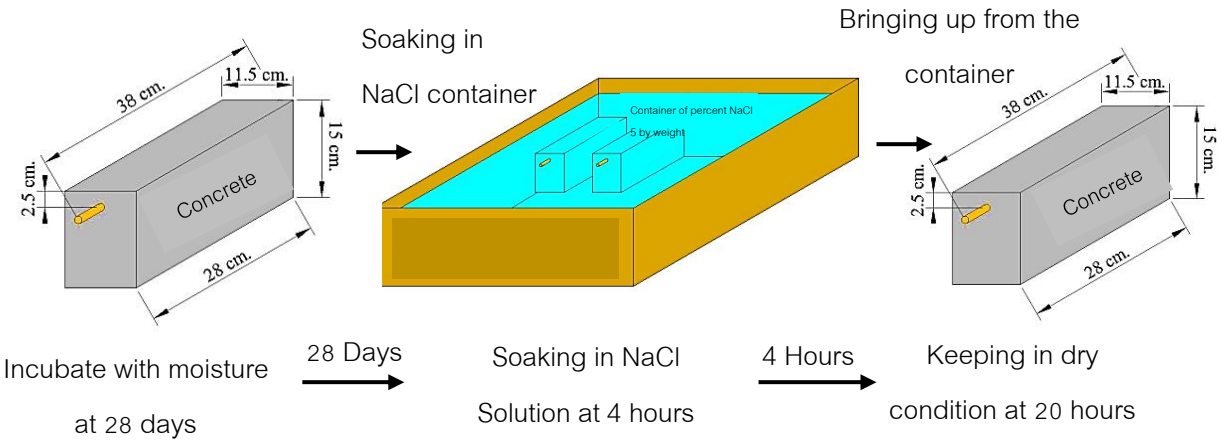


Figure 3 Wet-Dry Cycles Acceleration

5. การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตด้วยวิธีเร่งโดยไฟฟ้า

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาด 10x20 เซนติเมตร เสริมเหล็กกลม ขนาด 12 มิลลิเมตร อีพอกซี่มาทาบริเวณผิวคอนกรีตด้านบนที่ติดกับเหล็กเสริม บ่มด้วยความชื้นที่เวลา 28 วัน ขัดผิวเหล็กให้สะอาดเคลือบด้วยอีพอกซี่และเทปพันสายไฟ แล้วมาต่อกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้า 15 โวลล์ โดยมีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และนำแผ่นเหล็กแสตนเลสต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า แล้วเริ่มทำการเร่งสนิมด้วยไฟฟ้าเป็นเวลา 10 วัน และระหว่างการเร่งทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า จากนั้นทำการทุบก้อนคอนกรีตเพื่อนำเหล็กมาทำความสะอาด โดยนำเหล็กมาแช่ในสารละลายไฮโดรคลอริกร้อยละ 12 โดยปริมาตร เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เวลา 5 นาที น้ำมาล้างด้วยน้ำสะอาด และนำเหล็กมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4

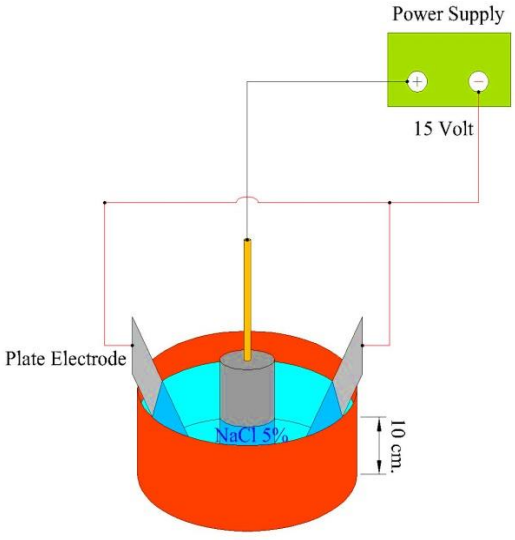


Figure 4 Corrosion Test of Reinforced Steel inside the Concrete by Electrical Acceleration

คำนวณหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมดังแสดงในสมการ 3

$$\eta_s = \frac{m_0 - m_c}{m_0} \times 100\% \qquad (3)$$

η_s คือ การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต (ร้อยละ)

m_o คือ น้ำหนักของเหล็กเสริมก่อนเกิดการกัดกร่อน (กรัม)

m_c คือ น้ำหนักของเหล็กเสริมหลังเกิดการกัดกร่อน (กรัม)

ผลการศึกษา

เมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนเกินกว่า 0.1 - 0.2 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามมาตรฐาน ASTM G109-99a ซึ่ง ณ สภาวะดังกล่าวพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ติดลบน้อยกว่า -350 มิลลิโวลล์ตามมาตรฐาน ASTM C876 ตามรูปที่ 6 และรูปที่ 7

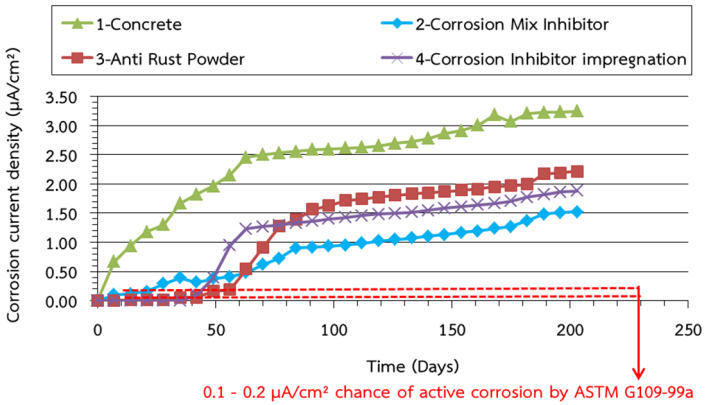


Figure 5 Corrosion current density of Resistor 100 Ω

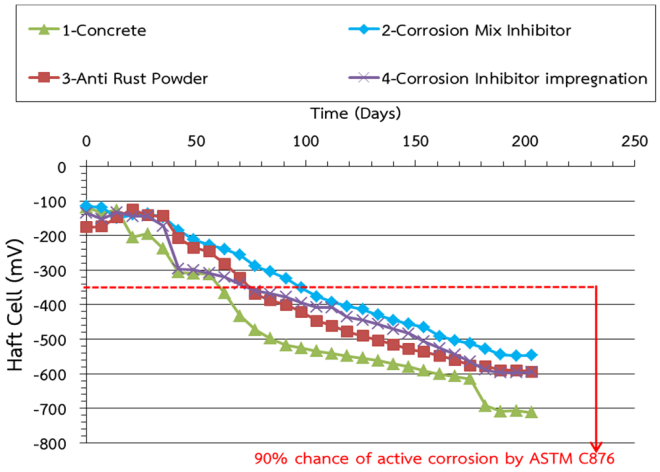


Figure 6 Half Cell Potential by Wet-Dry Cycles Acceleration exclusively on concrete surface (ASTM G109-99)

หลังจากเร่งการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตโดยให้เผชิญกับสภาวะเปียกสลับแห้งด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์จนเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อนในที่สุด ซึ่งสามารถทราบได้จากการทดสอบหาแนวโน้มที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Haft CellPotential) ซึ่งเมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีตมีแนวโน้มเกิดการกัดกร่อนค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ได้จากการทดสอบนั้นจะมีค่าน้อยกว่าและเท่ากับ -350 มิลลิโวลต์ ตามมาตรฐาน ASTM C876

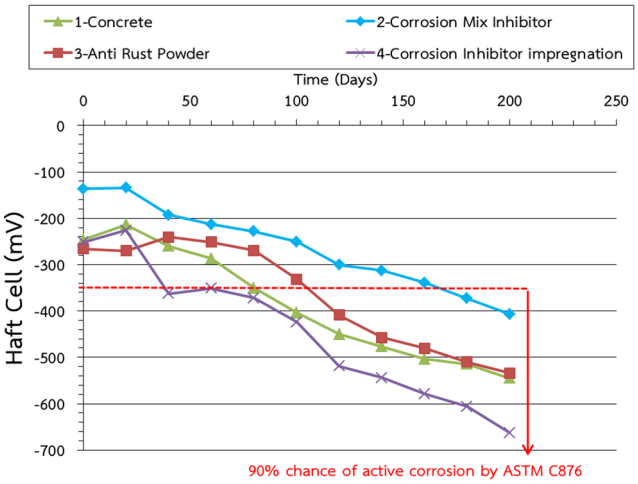


Figure 7 Half Cell Potential by Natural Acceleration (wet-dry cycles for a whole concrete lump sample)

จากการเร่งการกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยใช้ไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ 15 โวลล์ ด้วยระยะเวลา 10 วัน ปรากฏว่าเหล็กเสริมส่วนที่ฝังในคอนกรีตที่ระยะ 17 เซนติเมตร ถูกกัดกร่อนทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้น โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ได้จากการทดสอบนั้นจะมีค่ามากกว่า -350 มิลลิโวลต์ตามมาตรฐาน ASTM C876 ดังแสดงในรูปที่ 8

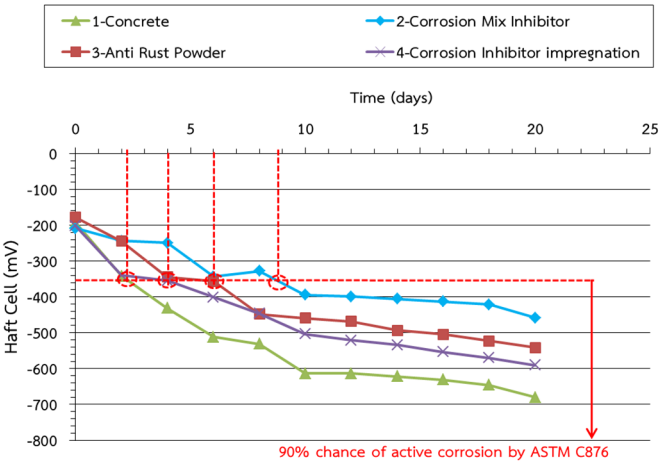


Figure 8 Half Cell Potential by Electrical Acceleration

โดยที่ระยะเวลาของการถูกการกัดกร่อนมีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันตามประเภทของสารยับยั้ง ตามแสดงใน รูปที่ 9

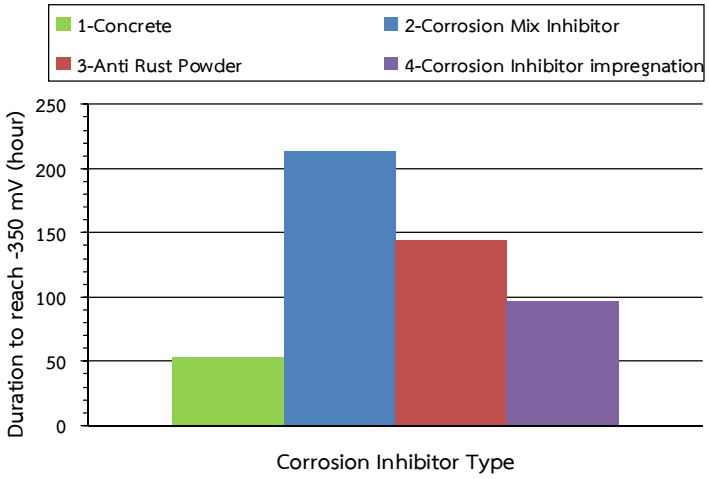


Figure 9 Time for different inhibitors to reach the erosion voltage of -350 mV (ASTM C876)

สรุป

จากผลการวิจัยในการทดสอบนั้น ทำให้เห็นว่า คอนกรีตที่ไม่ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนนั้นระยะเวลาของการเกิดกัดกร่อน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เกิดขึ้นได้เร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งอย่างชัดเจน แต่ในการทดสอบด้วยวิธีเร่งโดยวิธีธรรมชาติ (เปียกสลับแห้งทั้งก้อนตัวอย่างคอนกรีต) คอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งประเภททาเคลือบผิวด้านนอก(Corrosion Inhibitor impregnation) นั้นมีการกัดกร่อนที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้สารยับยั้ง เนื่องมากจากผิวบริเวณที่ทาเคลือบถูการสัมผัสกับน้ำโดยตรงและเป็นระยะเวลานานทำให้สารที่เคลือบที่ผิวหลุดออกมาได้

ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งประเภททาเคลือบที่ผิว(Corrosion Inhibitor impregnation) อาจจะไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานคอนกรีตบริเวณที่ต้องแช่น้ำ แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตประเภทที่มีประสิทธิภาพให้การยับยั้งการกัดกร่อนได้ดีที่สุดคือคอนกรีตที่ใช้สารยับยั้งประเภทผสมเพิ่มในคอนกรีตทั้งแอโนดและแคโทด (Corrosion Mix Inhibitor)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บริษัท เคมเมท เทรดดิ้ง จำกัด บริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ดร.ภัควัฒน์ แสนเจริญ. 2008. **สารยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม** (Corrosion Inhibitor). วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย ฉบับที่ 5 ประจำเดือนธันวาคม.

ASTM C 876-91. 1999. **Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in Concrete**. Annual Book of ASTM Standard.

ASTM G 109-99a. 1997. **Standard test method for determining the effects of chemical admixtures on the corrosion of embedded steel reinforcement in concrete exposure to chloride environments.** Annual Book of ASTM Standard.

ASTM C 1152/C 1152M – 97. 1997. **Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and Concrete**. Annual Book of ASTM Standard

มยผ.1507-51. 2551. **มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย**. กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย.

American Society for Testing and Materials. 2009. **ASTM C876-09-Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete.** American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA: ASTM Internationnal.

การออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดขนาดปลากะตักแห้ง

Design and Development of Dried Anchovy Sizing Machine

เอกสิทธิ์ ศรีธรรม[1*] และ **อำนาจ คูตะคุ**[1]

Eakasit Sritham[1*] and **Amnat Kutaku**[1]

บทคัดย่อ

การทดลองคัดขนาดปลากะตักแห้งด้วยเครื่องคัดขนาดแบบตะแกรงทรงกระบอกหมุนที่ออกแบบและสร้างขึ้น โดยปรับระดับมุมเอียงของตะแกรงคัดขนาดเป็น 1 2 และ 3 องศา และความเร็วรอบของตะแกรงเป็น 10 15 และ 20 รอบ/นาที พบว่าปัจจัยทั้งสองมีอิทธิพลต่ออัตราการคัดขนาดอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการคัดขนาด ที่ระดับมุมเอียง 1 2 และ 3 องศา อัตราการคัดขนาดโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 6.42 8.62 และ 10.76 กก./ชม. ตามลำดับ และที่ความเร็วรอบ 10 15 และ 20 รอบ/นาที อัตราการคัดขนาดโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 8.00 8.64 และ 9.16 กก./ชม. ตามลำดับ อัตราการคัดขนาดมีค่าสูงสุดประมาณ 11.4 กก./ชม. ที่ระดับมุมเอียง 3 องศาและความเร็วรอบ 20 รอบ/นาที ความถูกต้องของเครื่องคัดโดยเฉลี่ยจากปลาทุกขนาดอยู่ระหว่าง 81 ถึง 89 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

The experiment on performance of dried anchovy sizing machine using a cylindrical sieve which was designed and developed in this study was performed with the incline angle levels of 1°, 2° and 3°, and rotational speeds of 10, 15 and 20 rpm. It was found that both factors significantly affected the capacity of the machine; but did not affect the accuracy of sizing. At the incline angles of 1°, 2° and 3°, the average capacity of the machine were 6.42, 8.62 and 10.76 kg/hr, respectively, and at the rotational speeds of 10, 15 and 20 rpm, the average capacity were, respectively, 8.00, 8.64, and 9.16 kg/hr. The maximum capacity of 11.4 kg/hr was obtained when the incline angle was 3° and rotational speed was at 20 rpm. The overall accuracy of the machine was in a range of 81 to 89%.

Key Words: cylindrical sieve, dried anchovy, sizing machine

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ 10520

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

คำนำ

ปลากะตักหรือปลาไส้ตันเป็นปลาขนาดเล็กพบได้ทั่วไปในเขตน่านน้ำอินโด-แปซิฟิก (Wongrat, 2002) ปลากะตักเป็นปลาเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีราคาถูก เป็นแหล่งโปรตีน และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็น ปลาแห้ง ปลาป่น น้ำปลา และบูดู เป็นต้น ปลากะตักจากแหล่งทำการประมงบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามัน ภาคใต้ของประเทศไทยถูกแปรรูปเป็นปลาแห้งในปริมาณมากที่สุด และเป็นสินค้าส่งออกไปมาเลเซีย ศรีลังกา และฮ่องกง (สำนักงานปลัดกระทรวงการคลัง, 2559)

ในการผลิตปลากะตักแห้งนั้นสถานประกอบการจะนำปลาต้มในน้ำเกลือให้สุก แล้วจึงนำไปตากแห้งเพื่อลดความชื้นให้ไม่เกินร้อยละ 20 (สำนักงานมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2549) หลังจากนั้นจำเป็นต้องคัดขนาดปลาก่อนนำไปบรรจุเพื่อจำหน่ายต่อไป การกำหนดขนาดของปลากะตักแห้งในทางการค้าใช้เกณฑ์ด้านความยาวของตัวปลาในการแบ่งออกเป็น 5 ขนาด ปลาแห้งแต่ละขนาดมีราคาจำหน่ายต่อหน่วยน้ำหนักแตกต่างกัน ปลาที่มีขนาดเล็กมาก (20.0-25.0 มม.) มีราคาสูงที่สุด และปลาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีราคาต่อหน่วยน้ำหนักลดลงตามลำดับ สำหรับขนาดปลาอีก 4 ขนาด ได้แก่ ขนาดเล็ก (25.1-35.0 มม.) ขนาดปานกลาง (35.1-45.0 มม.) ขนาดใหญ่ (45.1-55.0 มม.) และขนาดใหญ่มาก (55.1-75.0 มม.) ดังแสดงใน Figure 1

ในปัจจุบันการคัดขนาดปลาแห้งต้องใช้แรงงานที่มีทักษะเฉพาะจำนวนมากและใช้เวลานาน จึงเป็นขั้นตอนที่นับเป็นปัญหาคอขวดในสายการผลิต (bottle neck process) ในการผลิตปลากะตักแห้งนั้น หลังจากที่ปลาผ่านกระบวนการต้มสุกและตากแห้งแล้วจะได้ปลากะตักแห้งออกมาเป็นจำนวนมาก ปลาแห้งที่รอการคัดขนาดเหล่านี้สามารถดูดความชื้นจากสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีโอกาสที่จะมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 20 ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพต่ำลง อายุการเก็บรักษาลดลง ซึ่งเป็นต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้นหากต้องนำปลากลับไปเข้ากระบวนการทำแห้งใหม่

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดขนาดปลากะตักแห้งโดยใช้ตะแกรงทรงกระบอกหมุน ผู้เขียนรายงานถึงผลกระทบที่เกิดจากการตั้งมุมเอียงระหว่างตะแกรงทรงกระบอกกับแนวระดับ และความเร็วรอบของตะแกรงทรงกระบอกต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องคัดขนาดปลากะตักแห้ง

Figure 1 Comparative image of five different sizes of dried anchovies: (a) extra-large, (b) large (c) medium, (d) small and (e) extra-small

ที่มา: อำนาจ และคณะ (2560)

การออกแบบเครื่องคัดขนาด

แม้ว่าเกณฑ์ที่ใช้ในการคัดขนาดปลากะตักแห้งในทางการค้าจะใช้สมบัติด้านความยาวของตัวปลา แต่จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวกับการออกแบบเครื่องคัดขนาด (Allen, 2003; Díaz-Zorita *et al*., 2007; Liu, 2009; Dowlati *et al*., 2012; Cao *et al*., 2018) หากใช้เกณฑ์ความยาวของปลามาออกแบบเครื่องนั้น ผู้เขียนอนุมานถึงปัญหาจากการที่ไม่สามารถควบคุมอัตราการคัดขนาดและความถูกต้องของการคัดขนาดผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงไม่เป็นเรขาคณิตอย่างปลากะตักได้ อย่างไรก็ตาม จากรายงานของอำนาจและคณะ (2560) พบว่าสมบัติด้านความยาวและความกว้างของตัวปลามีความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.01$) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (r) เท่ากับ 0.89 ผู้เขียนจึงมีแนวคิดในการออกแบบเครื่องคัดขนาดปลากะตักแห้งโดยประยุกต์ใช้ตะแกรงทรงกระบอกหมุนเพื่อคัดขนาดจากความกว้างของตัวปลา

ขนาดของรูตะแกรงที่เลือกใช้มาจากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความยาวต่อความกว้างตัวปลาอำนาจ และคณะ (2560) โดยเลือกขนาดรูตะแกรงใหญ่กว่าความกว้างตัวปลาแต่ละขนาดประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ความยาวของตะแกรงคัดขนาดแต่ละช่วงออกแบบโดยอาศัยข้อมูลด้านการกระจายตัวของขนาดปลากะตักตามธรรมชาติเป็นหลัก (Figure 2) แล้วปรับเปลี่ยนเพิ่มเติมตามความเหมาะสม จากการทดลองหาค่ามุมของแรงเสียดทานพบว่ามุมของแรงเสียดทานระหว่างปลากะตักแห้งกับตะแกรงมีค่าประมาณ 45 องศา (n=20) ซึ่งต่ำกว่ามุมของแรงเสียดทานระหว่างปลากะตักแห้งเอง ที่มีค่าประมาณ 63 องศา (n=20) ดังนั้น หากปลากะตักที่เรียงซ้อนกันเป็นชั้นหนาเคลื่อนที่ไปกับตะแกรงหมุนแล้ว ปลากะตักจะเกิดการไหลโดยที่ไม่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของปลากะตักเอง ปลาที่วางตัวอยู่ด้านบนก็ย่อมมีโอกาสที่จะถูกคัดแยกได้น้อย ด้วยเหตุนี้จึงมีการติดตั้งแผ่นครีบเพื่อช่วยพลิกปลาบริเวณผิวในของตะแกรงคัดขนาด

เครื่องคัดขนาดที่ออกแบบขึ้นมีส่วนประกอบหลักดังนี้ 1) ช่องป้อนปลากะตักแห้งคละขนาด 2) ชุดควบคุมอัตราการป้อน มีช่องเปิดขนาดเล็กและมีแผ่นกั้นเคลื่อนที่ได้สำหรับควบคุมอัตราการป้อนปลาแห้ง 3) ห้องแยกสิ่งสกปรกและผงฝุ่นออกจากปลาแห้งโดยการใช้พัดลม (Blower) ดูดอากาศในขณะที่ปลาแห้งตกอย่างอิสระในแนวดิ่งก่อนลงสู่ตะแกรงคัดขนาด 4) ชุดขับเคลื่อนตะแกรง ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ส่งกำลังด้วยสายพานลิ่มขับล้อยางที่สัมผัสกับผิวนอกของตะแกรงทรงกระบอก 5) ตะแกรงทรงกระบอกผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมดัดโค้งให้มีสันฐานเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 400 มม.ยาว 3 ม. แผ่นตะแกรงมีรูขนาดแตกต่างกัน 4 ระดับ คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.50 มม. ยาว 600 มม.เพื่อคัดปลาขนาดเล็กมาก เส้นผ่านศูนย์กลางรูตะแกรงขนาด 5.50 มม.ยาว 800 มม.เพื่อคัดขนาดปลาขนาดเล็ก รูตะแกรงขนาด 8.00 มม. ยาว 1000 มม.เพื่อคัดปลาขนาดปานกลาง รูตะแกรงขนาด 10 มม. ยาว 600 มม.เพื่อคัดปลาขนาดใหญ่ และปลาที่ไม่สามารถผ่านรูตะแกรงขนาดใดได้เลยถูกลำเลียงออกทางด้านท้ายของเครื่องคือปลาขนาดใหญ่มาก 6) ถาดรองรับปลาแห้งที่คัดเสร็จแล้ว 7) ไซโคลน สำหรับแยกสิ่งสกปรกจากลมที่ออกมาจากห้องแยกสิ่งสกปรกและผงฝุ่น 8) ครีบแบน (Baffle) สูง 25 มม.ในทิศรัศมีตลอดความยาวของตะแกรงถูกติดตั้งอยู่ด้านในเพื่อช่วยพลิกกลับปลาในขณะที่ตะแกรงหมุน

ส่วนประกอบหลักของเครื่องที่ออกแบบแสดงใน Figure 3 และรูปของเครื่องคัดขนาดที่สร้างขึ้นแสดงไว้ใน Figure 4

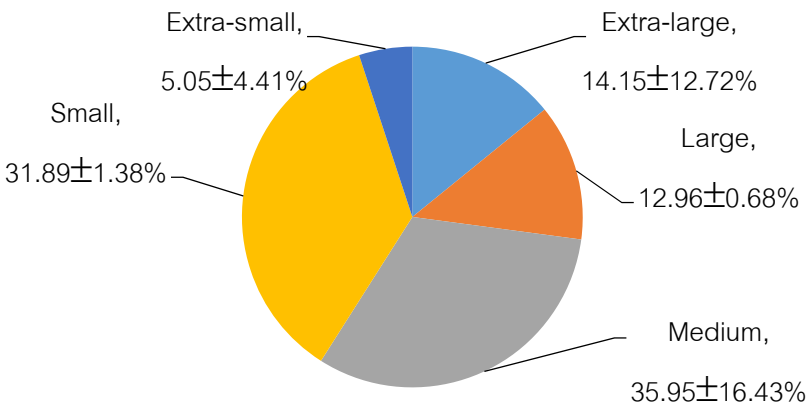


Figure 2 Size distribution of dried anchovies. Data were obtained from three batches of samples

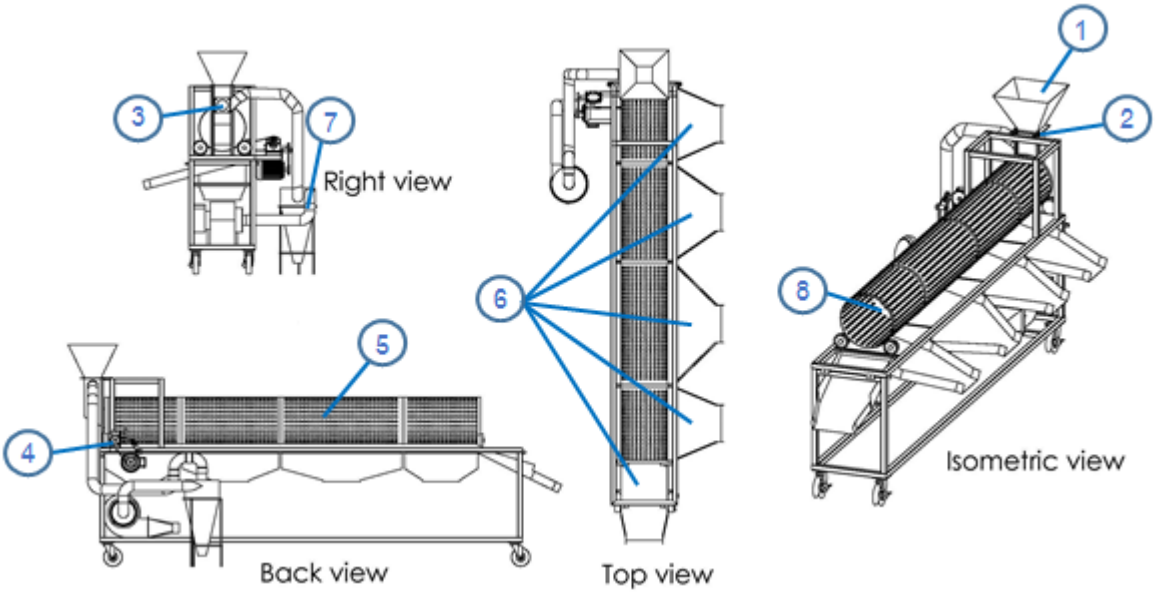


Figure 3 Assembly drawing of a cylindrical sieve sizing machine for dried anchovies

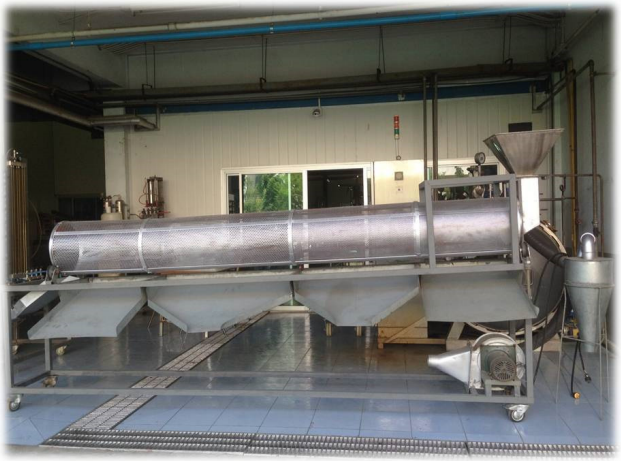


Figure 4 An image of a cylindrical sieve sizing-machine for dried anchovies

ระเบียบวิธีวิจัย

การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างปลากะตักแห้งจาก บริษัทมารีน ฟายน์ ฟูดส์ จำกัด จังหวัดระยอง ความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 20 ผ่านการคัดแยกเพื่อเอาปลาชนิดอื่นและเศษชิ้นส่วนปลาที่ไม่สมบูรณ์ออก และผ่านการคัดขนาดมาแล้ว โดยมีทั้งหมด 5 ขนาดตามที่ได้อธิบายไว้ อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างปลาแต่ละขนาดที่ได้รับมายังมีปลาขนาดอื่นปนอยู่อย่างเห็นได้ชัด จึงต้องทำการคัดขนาดอีกรอบอย่างละเอียด ก่อนการทดลองคัดขนาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น มีการนำตัวอย่างปลามาคละกันตามสัดส่วนของการกระจายตัวของปลากะตักขนาดต่าง ๆ ในธรรมชาติจากรายงานของ อำนาจ และคณะ (2560) และข้อมูลจากการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์เพิ่มเติม (Figure 2)

การทดลอง

ป้อนปลากะตักแห้งคละขนาดครั้งละ 2 กก. เข้าสู่ช่องป้อนโดยสุ่มลำดับการปรับตั้งระดับมุมเอียงของเครื่องคัดขนาด (ทำมุม 1 2 และ 3 องศา กับแนวระดับ) และในแต่ละระดับของมุมเอียงที่สุ่มได้ก็มีการสุ่มเลือกระดับความเร็วในการหมุนของตะแกรงจนครบทั้ง 3 ระดับ (10 15 และ 20 รอบ/นาที) ก่อนที่จะสุ่มเลือกระดับมุมเอียงต่อไปจนครบ 3 ระดับ ในแต่ละรอบการทดลอง ทำการบันทึกเวลาที่ใช้ในการคัดขนาดและรวบรวมปลาแห้งที่ผ่านการคัดขนาดในแต่ละช่องขนาด ทำการคัดแยกด้วยมืออีกครั้ง โดยแบ่งเป็น 1) ปลาที่มีขนาดตรงตามช่องคัดขนาด และ 2) ปลาที่มีขนาดผิดจากช่องคัดขนาด บันทึกน้ำหนักของปลาแต่ละส่วนในทุก ๆ ช่องขนาด ทำเช่นนี้จนครบ 3 ซ้ำของการทดลอง นำข้อมูลผลการทดลองมาคำนวณหาอัตราการคัดขนาด และเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการคัดขนาดปลากะตักแห้งที่คัดได้ตรงตามขนาดโดยใช้สมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{อัตราการคัดขนาด } (\text{กก./ชม.}) = \frac{\text{น้ำหนักปลาแห้งคละขนาด } (\text{กก.}) \times 60 (\text{นาที/ชม.})}{\text{เวลาในการคัดขนาด } (\text{ชม.})} \quad (1)$$

$$\text{ความถูกต้องของการคัดขนาด } (\%) = \frac{\text{น้ำหนักปลาแห้งที่ตรงกับขนาดช่องคัดขนาด } (\text{กก.}) \times 100}{\text{น้ำหนักปลาแห้งที่ตรงกับขนาดของช่องคัด} (\text{กก.}) + \text{น้ำหนักปลาแห้งที่ตกสู่ช่องคัดขนาดอื่น } (\text{กก.})} \quad (2)$$

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

งานวิจัยนี้ใช้แผนการทดลองแบบ Split-Plot Design ดำเนินการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน แล้วเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least significant different (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

อิทธิพลของมุมเอียงและความเร็วรอบของตะแกรงต่ออัตราการคัดขนาดปลากะตักแห้ง

อัตราการคัดขนาดปลากะตักแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของมุมเอียงหรือความเร็วรอบของตะแกรงเพิ่มขึ้น (Figure 5) จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยทั้งสองมีอิทธิพลต่ออัตราการคัดขนาดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.01$) แต่ไม่พบอิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัย โดยที่ทุก ๆ ระดับของการเพิ่มขึ้นของปัจจัยทั้งสองมีผลให้อัตราการคัดขนาดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (α=0.05). อัตราการคัดขนาดโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 6.42, 8.62, and 10.76 กก./ชม. เมื่อระดับของมุมเอียงเป็น 1 2 และ 3 องศา ตามลำดับ และเมื่อความเร็วรอบของตะแกรงเป็น 10 15

และ 20 รอบ/นาที อัตราการคัดขนาดโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 8.00, 8.64, and 9.16 กก./ชม. ตามลำดับ อัตราการคัดขนาดมีค่าสูงสุดประมาณ 11.4 กก./ชม. เมื่อระดับมุมเอียงและความเร็วรอบของตะแกรงถูกตั้งค่าเป็น 3 องศา และ 20 รอบ/นาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นระดับสูงสุดของปัจจัยทั้งสองในงานทดลองนี้

ผลการทดลองนับว่าเป็นไปตามที่คาดหมาย กล่าวคือเมื่อมุมเอียงของตะแกรงเพิ่มขึ้นย่อมทำให้แรงโน้มถ่วงมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของปลากะตักแห้งไปตามแนวแกนของตะแกรงคัดขนาดมากขึ้น ในขณะที่ตะแกรงหมุนพาปลาขึ้นไปตามตะแกรงจนเมื่อมุมเอียงมีค่าสูงกว่าค่ามุมของแรงเสียดทานระหว่างปลากะตักแห้งกับตะแกรง ปลาจะเริ่มไหลลงสวนทางกับทิศการหมุนของตะแกรง ดังนั้นการเพิ่มความเร็วรอบของตะแกรงย่อมส่งผลให้ความถี่ในการเริ่มไหลลงของปลาสูงขึ้น ทำให้ปลาถูกลำเลียงไปตามแนวแกนของตะแกรงคัดขนาดเร็วขึ้น อัตราการคัดขนาดจึงสูงขึ้น ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอัตราการคัดขนาดปลากะตักแห้งของเครื่องคัดอาจสูงขึ้นได้อีก หากเพิ่มระดับความเอียงและความเร็วรอบของตะแกรงคัดขนาด อย่างไรก็ตาม เมื่อตะแกรงคัดขนาดเอียงมากขึ้นการสึกหรอของเครื่องคัดขนาดอันเนื่องมาจากแรงรูนก็ย่อมมากขึ้น และเมื่อตะแกรงหมุนเร็วขึ้น แรงเหวี่ยงหนีศูนย์อาจเข้ามามีอิทธิพลมากเกินไปจนอาจทำให้ทั้งอัตราการคัดขนาดและเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการคัดขนาดลดลง สิ่งเหล่านี้ควรต้องนำมาพิจารณาและศึกษาต่อไป

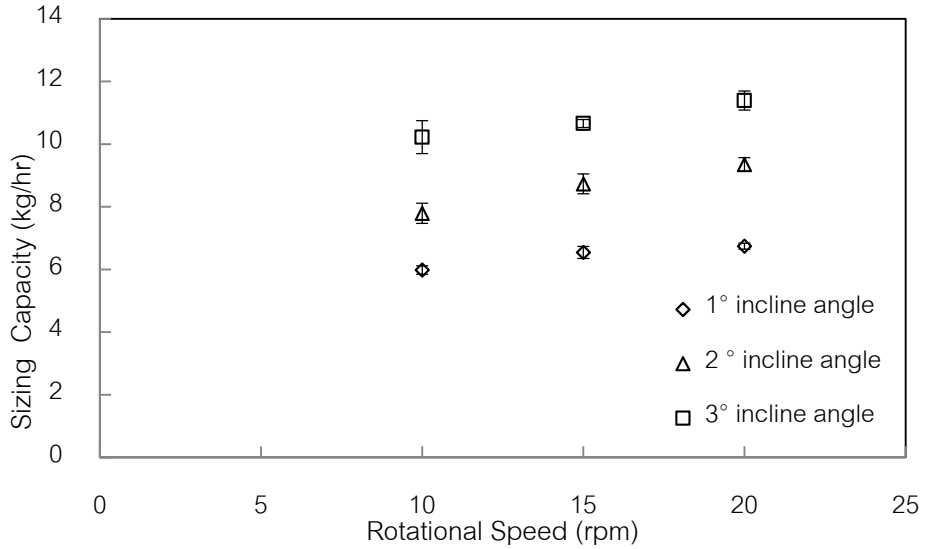


Figure 5 Capacity of anchovy sizing machine at various experimental settings. Error bars are corresponding standard deviation (n=3).

เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการคัดขนาดปลากะตักแห้งด้วยเครื่องคัดขนาด

ความถูกต้องของการคัดขนาดปลากะตักแห้งอยู่ในช่วงประมาณ 77 ถึง 97 เปอร์เซ็นต์ (Table 1) โดยหากพิจารณาความถูกต้องของการคัดโดยเฉลี่ยจากปลาทุกขนาด (Overall accuracy) แล้ว พบว่าค่าความถูกต้องของการคัดขนาดอยู่ระหว่าง 81 ถึง 89 เปอร์เซ็นต์ อย่างก็ตาม ระดับของมุมเอียงและความเร็วในการหมุนของตะแกรงคัดขนาดในช่วงที่ทำการศึกษาไม่ได้มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการคัดขนาดปลากะตักแห้ง ($p>0.05$) ด้วยเครื่องคัดขนาด

เมื่อพิจารณาความถูกต้องโดยรวมของการคัดขนาดปลาแต่ละขนาดแล้วพบว่ามีค่าประมาณ 82 ถึง 92 เปอร์เซ็นต์ นอกจากเหตุผลด้านการออกแบบโดยเฉพาะข้อจำกัดด้านขนาดของตะแกรงที่หาได้ตามท้องตลาดและความยาวของช่วงตะแกรงคัดขนาดที่ออกแบบแล้ว สิ่งที่อาจทำให้ความถูกต้องของการคัดปลาแตกต่างกันคือสัดส่วนตามธรรมชาติของปลาแต่ละขนาด (Figure 2) ในกรณีของปลาขนาดเล็กมากซึ่งมีสัดส่วนเพียง 5 เปอร์เซ็นต์นั้น ความผิดพลาดในการคัดแม้เพียงจำนวนเล็กน้อยก็มีผลให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องค่อนข้างต่ำ ส่วนปลาขนาดเล็กและขนาดปานกลางซึ่งมีสัดส่วนโดยเฉลี่ยที่สูงกว่าขนาดอื่น ๆ คือ 32 และ 36 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับนั้น ควรมีค่าความถูกต้องของการคัดขนาดสูงใกล้เคียงกัน จากการผลการทดลองพบว่าความถูกต้องของการคัดปลาขนาดเล็กมีค่าสูงที่สุดคือ 92 เปอร์เซ็นต์ แต่ความถูกต้องของการคัดปลาขนาดปานกลางกลับมีค่าเพียง 82 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัดส่วนปลาขนาดปานกลางพบว่ามีมากกว่า 16 เปอร์เซ็นต์ (Figure 2) จากข้อมูลการวิเคราะห์ในบางตัวอย่างพบว่าปลาขนาดปานกลางมีสัดส่วนที่สูงถึง 43.5 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าช่วงตะแกรงคัดขนาดสำหรับปลาขนาดปานกลางควรมีความยาวมากขึ้น ซึ่งน่าจะส่งผลให้ความถูกต้องของการคัดปลาขนาดใหญ่สูงขึ้นไปด้วย เพราะโอกาสที่ปลาขนาดปานกลางจะถูกลำเลียงผ่านไปยังช่วงตะแกรงคัดขนาดสำหรับปลาขนาดใหญ่น้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการคัดขนาดปลากะตักแห้งด้วยเครื่องคัดขนาดที่สร้างขึ้นกับการคัดขนาดด้วยแรงงานในสายการผลิตของผู้ผลิตแล้ว พบว่าเครื่องคัดขนาดแบบตะแกรงทรงกระบอกหมุนสามารถคัดขนาดได้ถูกต้องมากกว่าการคัดด้วยแรงงานซึ่งมีค่าความถูกต้องของการคัดโดยเฉลี่ยประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ (ข้อมูลการวิเคราะห์จาก 2 กลุ่มตัวอย่าง)

Table 1 Accuracy of the anchovy sizing machine

Incline Angle (°)	Rotational Speed (rpm)	Accuracy of Sizing (%)					
		Extra-small	Small	Medium	Large	Extra-large	Overall
1	10	88.41±3.57	93.74±3.11	86.84±2.01	86.67±4.44	91.58±4.41	89.25±4.16
	15	78.22±9.45	93.37±0.79	86.62±1.36	83.66±4.53	87.13±6.04	85.80±6.60
	20	81.79±2.16	96.55±0.18	79.03±2.24	81.53±4.19	90.16±5.21	85.81±7.33
2	10	84.23±3.02	94.07±1.52	73.91±0.80	77.24±1.20	90.45±3.02	83.98±8.19
	15	82.23±6.76	90.32±4.91	82.05±7.63	77.41±3.03	74.47±5.01	81.30±7.08
	20	80.00±8.92	93.44±1.20	76.07±2.73	77.05±1.61	77.97±1.80	80.90±7.48
3	10	85.66±2.67	91.33±2.59	84.23±2.78	86.43±1.51	83.93±10.54	86.32±4.79
	15	84.48±3.25	90.74±9.18	79.97±5.33	80.28±9.56	81.62±5.16	83.42±6.67
	20	88.30±2.25	87.48±7.18	84.80±1.39	89.16±1.25	89.96±7.00	87.94±3.95
	Overall	83.70±5.20	92.34±4.15	81.50±5.16	82.05±5.33	85.25±7.31	

Errors were standard deviation (n=3 for the accuracy obtained for ach size and each setting; n=15 for the overall accuracy obtained for each setting; and n=27 for the overall accuracy obtained for each size).

สรุป

ระดับของมุมเอียงและความเร็วในการหมุนของตะแกรงมีผลต่ออัตราการคัดขนาดปลากะตักแห้ง แต่ไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการคัดขนาด อัตราการคัดขนาดปลากะตักแห้งสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระดับของมุมเอียงหรือเพิ่มความเร็วรอบของตะแกรงคัดขนาด เครื่องคัดขนาดที่ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถคัดขนาดปลากะตักแห้งได้ถูกต้องมากกว่าการคัดขนาดโดยแรงงาน อัตราการคัดขนาดของเครื่องมีค่าสูงสุดประมาณ 11.4 กก./ชม. เมื่อระดับมุมเอียงและความเร็วรอบของตะแกรงเป็น 3 องศา และ 20 รอบ/นาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นระดับสูงสุดของปัจจัยทั้งสองในงานทดลองนี้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท มารีน ฟายน์ ฟูดส์ จำกัด จังหวัดระยอง ที่อนุเคราะห์ปลากะตักแห้งในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานปลัดกระทรวงการคลัง. 2559. **คลินิกภาษีปลากะตักตากแห้ง**. แหล่งที่มา: http://taxclinic.mof.go.th/สินค้า-136-คลินิกภาษีปลากะตักตากแห้ง.html, 1 ตุลาคม 2560.

สำนักงานมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2549. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 6/2549: ปลาแห้ง (Dried fish)**. แหล่งที่มา: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps6_49.pdf, 1 ตุลาคม 2560.

อำนาจ คูตะคุ, เอกสิทธิ์ ศรีธรรม, เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ และ สาทิป รัตนภาสกร. 2560. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของปลากะตักแห้งเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดขนาด, น. 484-491. *ใน* **เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Allen, T. 2003. 4 - Particle size analysis by sieving. *In* T. Allen, ed. **Powder Sampling and Particle Size Determination**. Elsevier, Amsterdam.

Cao, B., Jia, F., Zeng, Y., Han, Y., Meng, X. and Xiao, Y. 2018. Effects of rotation speed and rice sieve geometry on turbulent motion of particles in a vertical rice mill. **Powder Technology** 325: 429-440.

Díaz-zorita, M., Grove, J. H. and Perfect, E. 2007. Sieving duration and sieve loading impacts on dry soil fragment size distributions. **Soil and Tillage Research** 94: 15-20.

Dowlati, M., De la Guardia, M. and Mohtasebi, S. S. 2012. Application of machine-vision techniques to fish-quality assessment. **TrAC Trends in Analytical Chemistry** 40: 168-179.

Liu, K. 2009. Some factors affecting sieving performance and efficiency. **Powder Technology** 193: 208-213.

Wongrat, T. 2002. The Living Marine Resources of the Western Central Pacific, pp. 1698-1821. *In* K. E.Carpenter, ed. **FAO Species Identification Guide for Fishery Purposes**, vol. 3. FAO, Rome.

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

Subject: Architecture and Engineering

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

การศึกษาสัดส่วนการเลือกรูปแบบการเดินทางระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้า กรณีศึกษา: รถไฟฟ้าสายสีเขียวสถานีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Study of Transportation Modal Choice Decisions between Private Car and Mass Rapid Transit: A Case Study of Green Line Sky Train, Kasetsart University Station

ณัฐชนน อัตตาภิบาล[1] เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล[1*] ชวเลข วณิชเวทิน[1] และ วิโรจน์ รุโจปการ[1]

Natchanon Auttapibarn[1], Ackchai Sirikijpanichkul[1*], Chavalek Vanichavetin[1] and Wiroj Rujopakarn[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสัดส่วนการเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้ที่เดินทางมายังมหาวิยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยวิธีการสำรวจความเห็นผ่านสถานการณ์สมมติ (Stated Preference Survey) เพื่อวัดความพึงพอใจด้านเวลาและค่าใช้จ่ายตามหลักทฤษฎีอรรถประโยชน์ (Utility) จากการศึกษาพบว่าผู้ที่เดินทางด้วยรถไฟฟ้าระยะทางไม่เกิน 5 กิโลเมตรมีการเชื่อมต่อภายในด้วยรถบัสของมหาวิทยาลัยจะเลือกใช้บริการรถไฟฟ้าเพียง 13.2% และเมื่อระยะทางมากกว่า 10 กิโลเมตรขึ้นไปมีผู้เลือกใช้บริการรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 57.4% ซึ่งในรูปแบบการเชื่อมต่อภายในด้วยรถจักรยานยนต์รับจ้างเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ผลการวิจัยพบว่าในระยะการเดินทางสั้น ๆ แม้ว่าค่าใช้จ่ายและเวลาของการเดินทางโดยรถยนต์เปรียบเทียบกับรถไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกันแต่การเดินทางโดยรถยนต์จะมีความสะดวกสบายกว่า แต่เมื่อระยะทางไกลขึ้นการเดินทางด้วยรถไฟฟ้าสามารถประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายได้มากกว่ารถยนต์ส่วนบุคคลจึงทำให้มีความต้องการที่จะใช้บริการรถไฟฟ้ามากขึ้น

ABSTRACT

The objective of this research is to study the transportation modal choice decisions for commuting trips to Kasetsart University. The stated preference survey technique is adopted by allowing the commuters to select their preferred choices between private car and the future sky train in the nine simulated situations in order to measure the preference of the people in terms of time consuming and expense based on Utility theory. The study shows that only 13.2 percent of respondents choose to travel by sky train with local bus transfer for the commuting trips within 5-kilometer coverage compare to 57.4 percent of those who travel further than 10 kilometers. The similar trend also appears in the sky train with motorcycle taxi transfer. In conclusion, despite similar travel costs and travel times between modes in short-distance trips, private car is still preferred in term of superior comfort and convenience. However, for longer distance trips, sky train is more preferable in term of travel time and cost savings.

Key word: Stated Preference, Utility theory, Sky train, Private Car

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาและขยายตัวในทุก ๆ ส่วนของประเทศอย่างกว้างขวาง โดยมีศูนย์กลางอยู่ที่เมืองหลวง คือ กรุงเทพมหานครซึ่งมีประชากรไม่รวมประชากรแฝงกว่า 5 ล้านคน (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์กรุงเทพมหานคร, 2560) ส่งผลให้เกิดความต้องการในการเดินทางเป็นจำนวนมากไม่ว่าจะเป็นการเดินทางไปทำงาน ไปห้างสรรพสินค้า ไปเรียนหนังสือ กลับที่พักอาศัย จากการเพิ่มขึ้นของประชากรประกอบกับการเจริญเติบโตของเมือง การให้บริการด้านระบบขนส่งสาธารณะเป็นทางเลือกในการเดินทางที่สำคัญ โดยระบบขนส่งสาธารณะต้องสามารถรองรับปริมาณการเดินทางที่จะเกิดขึ้นในแต่ละวันได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการและต้องเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ในอดีตกรุงเทพมหานครได้มุ่งเน้นการเพิ่มปริมาณเส้นทางจราจร จำนวนช่องจราจร หรือแม้แต่การเพิ่มระบบขนส่งสาธารณะในรูปแบบรถโดยสารประจำทาง รถตู้สาธารณะ เพื่อรองรับปริมาณการเดินทาง ซึ่งแนวทางเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ปริมาณยานพาหนะในท้องถนนเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ทำให้กรุงเทพมหานครเป็นเมืองที่มีการจราจรติดขัดอันดับต้น ๆ ของโลก จนกระทั่งได้มีโครงการจัดทำแผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (M-Map) ดำเนินการโดยสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร โดยได้รับมอบหมายจากคณะรัฐมนตรีให้เร่งดำเนินงานร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องให้มีการก่อสร้างรถไฟฟ้าในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อรองรับปริมาณการเดินทางของประชากรในเมืองหลวง โดยได้เปิดให้บริการสายสุขุมวิท (หมอชิต - อ่อนนุช) และสายสีลม (สนามกีฬาแห่งชาติ - สะพานตากสิน) เป็นครั้งแรกในวันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ.2542

การศึกษาและวิจัยครั้งนี้มีความต้องการหาสัดส่วนการเลือกใช้รูปแบบการเดินทางระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคลและระบบขนส่งสาธารณะในรูปแบบรถไฟฟ้า กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีเขียว (หมอชิต – สะพานใหม่ – คูคต) ซึ่งเป็นสายที่มีเส้นทางผ่านบริเวณหน้ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน และมีการเชื่อมต่อภายใน 2 รูปแบบ คือ รถบัสของมหาวิทยาลัยและรถจักรยานยนต์รับจ้าง ด้วยวิธีการสร้างแบบสอบถามโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลลักษณะทั่วไปของผู้เดินทาง ข้อมูลลักษณะการเดินทางในปัจจุบัน และการสร้างสถานการณ์สมมติ Stated Preference (SP) ให้ผู้ตอบแบบสอบถามเปรียบเทียบความพึงพอใจของปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกัน บนพื้นฐานของทฤษฎีอรรถประโยชน์ (Utility) และนำไปสู่การสร้างแบบจำลอง Binary Logit Model งานวิจัยในครั้งนี้อาจจะมีประโยชน์ต่อนักศึกษา บุคลากร และองค์กรต่าง ๆ ที่อยู่ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาจากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ ปรับปรุง แก้ไข เพื่อลดจำนวนรถยนต์ส่วนบุคคลและพัฒนาให้รถไฟฟ้าสายสีเขียวเป็นที่ต้องการในการใช้บริการให้ดียิ่งขึ้นในลำดับต่อไป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองการเลือกรูปแบบการเดินทาง

สุรเมศวร์ (2551) แบบจำลองการเลือกรูปแบบการเดินทาง (Mode choice or Modal split model) ซึ่งมักนิยมใช้ในการวิเคราะห์นั้นเป็นแบบจำลองแยกย่อย (Disaggregate model) ซึ่งอยู่ในรูปของแบบจำลองโลจิต (Logit model) ประกอบด้วยฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์ของรูปแบบการเดินทางแต่ละประเภทที่พิจารณาโดยทั่วไป ถ้ามีตัวเลือก 2 รูปแบบจะเรียกแบบจำลองดังกล่าวว่า Binary logit model (BNL) แต่ถ้ารูปแบบการเดินทางที่มา

วิเคราะห์พฤติกรรมการเลือกของผู้เดินทางมีมากกว่า 2 รูปแบบ จะเรียกแบบจำลองดังกล่าวว่า Multinomial logit model (MNL) และจะแสดงรูปแบบทั่วไปของสมการดังต่อไปนี้

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in}$$

โดยที่ U_{in} คือ อรรถประโยชน์หรือความพึงพอใจของคนที่ n ที่มีต่อทางเลือก i

V_{in} คือ ส่วนของอรรถประโยชน์ที่บุคคล n รับรู้และเห็นได้

ε_{in} คือ ส่วนของอรรถประโยชน์ที่ไม่แน่นอน

ส่วนของอรรถประโยชน์ที่รับรู้และเห็นได้ V_{in} นี้ส่วนใหญ่จะกำหนดให้เป็นฟังก์ชันในรูปแบบ

$$V_{in} = \beta_0 + \beta_1 X_{in1} + \beta_2 X_{in2} + \ldots + \beta_n X_{ink}$$

โดยที่ $\beta_0,\beta_1,\beta_2,\ldots,\beta_n$ คือ พารามิเตอร์หรือค่าคงที่ที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง

$X_1,X_2,\ldots,X_k$ คือ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอรรถประโยชน์ของสิ่ง i ของบุคคล n

เทคนิคการออกแบบสอบถามเพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

ในการสำรวจข้อมูลที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ Revealed Preference (RP) เป็นการสำรวจความพึงพอใจของผู้เดินทางภายใต้สถานการณ์จริงที่มีอยู่ในปัจจุบัน และ Stated Preference (SP) เป็นการสำรวจความพึงพอใจของผู้เดินทางต่อรูปแบบการเดินทางที่จะเกิดขึ้นในอนาคตโดยการสมมติสถานการณ์จำลองขึ้นมา

อุปกรณ์และวิธีการ

การสร้างแบบสอบถาม

งานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการวิจัย โดยเน้นกลุ่มตัวอย่างที่เป็นบุคลากรที่ทำงานภายในมหาวิทยาลัยและโดยสารด้วยรถยนต์ส่วนบุคคล เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลส่วนบุคคล ข้อมูลลักษณะการเดินทางและอิทธิพลของปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่ายต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้าซึ่งใช้เป็นกรณีศึกษา โดยการสร้างแบบสอบถามจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 จะเป็นการสอบถามข้อมูลคุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้เดินทาง ได้แก่ เพศ อายุ อาชีพ ระดับการศึกษา รายได้ต่อเดือน ใบอนุญาตขับขี่ จำนวนยานพาหนะส่วนตัว ในส่วนนี้ผู้เขียนมีความต้องการที่จะทราบถึงค่าสถิติเบื้องต้นของกลุ่มตัวอย่างว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการดำเนินงานหรือไม่

ส่วนที่ 2 สอบถามข้อมูลลักษณะการเดินทางในปัจจุบันของผู้เดินทาง เพื่อให้ทราบถึง ความถี่ เวลา ค่าใช้จ่าย วัตถุประสงค์ จำนวนผู้ร่วมเดินทาง ฯลฯ อีกทั้งยังสอบถามความต้องการของผู้ตอบแบบสอบถามกรณีในอนาคตหากมีรถไฟฟ้าผ่านมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ท่านจะใช้บริการหรือไม่ เพื่อดูแนวโน้มของผู้เดินทางเบื้องต้นว่ามีความสนใจที่จะมาเลือกใช้บริการรถไฟฟ้ามากน้อยเพียงใด

ส่วนที่ 3 สร้างสถานการณ์สมมติเมื่อเวลาและค่าใช้จ่ายของรถไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนบุคคลทั้ง 9 สถานการณ์ โดยแบ่งระยะทางจากต้นทางถึงปลายทางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ออกเป็น 3 ระยะ คือ ไม่เกิน 5 กิโลเมตร 5-10 กิโลเมตรและ 10 กิโลเมตรขึ้นไป โดยมีการเชื่อมต่อภายในมหาวิทยาลัย 2 รูปแบบ ได้แก่ รถบัสของมหาวิทยาลัย(รถตะไล)และรถจักรยานยนต์รับจ้าง ให้ผู้ตอบแบบสอบถามพิจารณาว่าจะเลือกใช้บริการรถไฟฟ้าในสถานการณ์ใดบ้าง ในส่วนนี้ผู้เขียนต้องประมาณค่าปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางจากการตั้งสมมติฐานทั้งในส่วนของรถไฟฟ้า รถยนต์ส่วนบุคคลและ

รูปแบบการเชื่อมต่อภายใน โดยอ้างอิงแหล่งที่มา ณ ปัจจุบัน ดังเช่น ความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์ส่วนบุคคลในกรุงเทพมหานคร 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (สำนักงานนโยบายและแผนการจราจรและขนส่ง, 2558) น้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ 95 ราคา 25.55 ต่อลิตร (บริษัท ปตท. จำกัด, 2560) เป็นต้น

การเก็บรวบรวมข้อมูล

เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างเป็นบุคลากรที่ทำงานอยู่ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การเก็บแบบสอบถามจะต้องมีระบบและขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อขอเข้าไปเก็บข้อมูลภายในหน่วยงานนั้น ผู้เขียนต้องดำเนินการทำหนังสือ(บันทึกข้อความ) เรื่อง ขอความอนุเคราะห์ให้กรอกแบบสอบถาม ให้คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติ และจึงยื่นหนังสือไปถึงคณบดีคณะต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จำนวน 15 คณะ 1 วิทยาลัย โดยผู้เขียนได้เริ่มดำเนินการเก็บแบบสอบถามตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2560 และใช้เวลาเก็บแบบสอบถามทั้งสิ้นประมาณ 1 เดือน ได้แบบสอบถามทั้งหมดกว่า 400 ชุด

ผลการทดลอง

ข้อมูลของผู้ตอบแบบสอบถาม

ในการวิเคราะห์ข้อมูลผู้เขียนได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS วิเคราะห์ค่าสถิติเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบกลุ่มตัวอย่างจำนวน 400 ข้อมูลที่ผู้เขียนได้ลงพื้นที่สำรวจแบบสอบถามว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ จากที่ได้กล่าวไปในตอนต้นการทำวิจัยในครั้งนี้ผู้เขียนได้เน้นกลุ่มตัวอย่างเป็นบุคลากรที่เดินทางมายังมหาวิทยาลัยด้วยรถยนต์ส่วนบุคคล จากตารางที่ 1 ค่าสถิติเบื้องต้นจะเห็นได้ว่าข้อมูลกลุ่มอาชีพมีนักศึกษา 7.8% ทั้งนี้สาเหตุอาจมาจากบางคณะไม่อนุญาตให้ผู้เขียนเดินแจกแบบสอบถามด้วยตัวเอง โดยให้ฝากเจ้าหน้าที่ประจำคณะเพื่อดำเนินการแจกแบบสอบถามเอง ซึ่งในห้องทำงานของบุคลากรในบางคณะได้มีนักศึกษา(ปริญญาโทและเอก)เข้ามาช่วยงานจึงทำให้กลุ่มตัวอย่างมีนักศึกษาปะปนมาได้บ้าง และเบื้องต้นถ้าในอนาคตรถไฟฟ้าสายสีเขียว(กรณีศึกษา)ก่อสร้างแล้วเสร็จบุคลากรของมหาวิทยาลัยจะมีความสนใจหันมาใช้บริการถึง 77.8%

Table 1 Initial statistic of respondents

Categories		Frequency	Percentage
Gender	Male	131	32.8%
	Female	269	67.3%
Age	Lower than 30 years old	114	28.6%
	31-40 years old	130	32.5%
	41-50 years old	101	25.3%
	More than 51 years old	55	13.8%
Occupation	Government officer	39	9.8%
	Government Employee	203	50.8%
	Private officer	102	25.5%
	Student	31	7.8%
	Others	25	6.3%

Education	Lower degree	53	13.3%
	Bachelor degree	240	60.0%
	Master degree	94	23.5%
	Postgraduate degree	13	3.3%
Salary	Lower than 15,000 THB	82	20.5%
	15,000-25,000 THB	203	50.8%
	25,001-35,000 THB	67	16.8%
	More than 35,000 THB	48	12.0%
Trip Purpose	Work	369	92.3%
	Others	31	7.9%
Traveling Frequency	Lower than 4 days	20	5.1%
	More than 5 days	380	95.0%
If having sky train	Use	311	77.8%
	Do not use	89	22.3%

ผลการวิเคราะห์อรรถประโยชน์ (Utility)

จากแบบสอบถามจำนวน 400 ชุด สถานการณ์สมมติในการเลือกรูปแบบการเดินทางระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้าทั้ง 9 สถานการณ์ที่มีการเชื่อมต่อภายใน 2 รูปแบบ ดังนั้นจะมีชุดข้อมูลที่วิเคราะห์สมการอรรถประโยชน์รูปแบบละ 3,600 ข้อมูล เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร ค่าคงที่ และค่าความถูกต้องของการพยากรณ์ ด้วยวิธี Maximum likelihood มีรูปแบบสมการดังต่อไปนี้

กรณี 1 จากการเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลหากเปลี่ยนมาใช้บริการรถไฟฟ้าจะต้องมีการเชื่อมต่อภายในมหาวิทยาลัยด้วยรถบัสของมหาวิทยาลัย(รถตะไล) จะได้แสดงสมการโลจิตดังต่อไปนี้โดยมีค่า R-Square = 0.249, Log-Likehood = -1724.615, p-value = 0.000

$$U_{\text{Private Car}} = 1.614 - 0.112\ (TC) - 0.0828\ (TT)$$

$$U_{\text{Sky Train}} = -0.112\ (TC) - 0.0828\ (TT)$$

กรณี 2 จากการเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลหากเปลี่ยนมาใช้บริการรถไฟฟ้าจะต้องมีการเชื่อมต่อภายในมหาวิทยาลัยด้วยรถจักรยานยนต์รับจ้าง จะได้แสดงสมการโลจิตดังต่อไปนี้โดยมีค่า R-Square = 0.216, Log-Likehood = -1806.262, p-value = 0.000

$$U_{\text{Private Car}} = 0.934 - 0.101\ (TC) - 0.066\ (TT)$$

$$U_{\text{Sky Train}} = -0.101\ (TC) - 0.066\ (TT)$$

โดยที่ ; $U_{\text{Private Car}}$ คือ อรรถประโยชน์ของรถยนต์ส่วนบุคคล

$U_{\text{Sky Train}}$ คือ อรรถประโยชน์ของรถไฟฟ้าสายสีเขียว

TT คือ เวลาในการเดินทาง (นาที)

TC คือ ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท)

ในอนาคตหากรถไฟฟ้าสายสีเขียว(กรณีศึกษา)ก่อสร้างแล้วเสร็จจะมีสัดส่วนความน่าจะเป็นในการเลือกเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้าจากการแทนค่าราคากลางที่ได้จากการสร้างสถานการณ์สมมติเปรียบเทียบตามระยะทางดังแสดงใน ตารางที่ 2 และรูปที่ 1

Table 2 Proportion of traveling to Kasetsart University

Last-mile Access	Distance					
	Not more than 5 kilometers		5-10 kilometers		More than 10 kilometers	
	Private Car	Sky Train	Private Car	Sky Train	Private Car	Sky Train
University buses	86.8%	13.2%	68.5%	31.5%	42.6%	57.4%
Motorcycle taxi	90.2%	9.8%	70.1%	29.9%	51.3%	48.7%

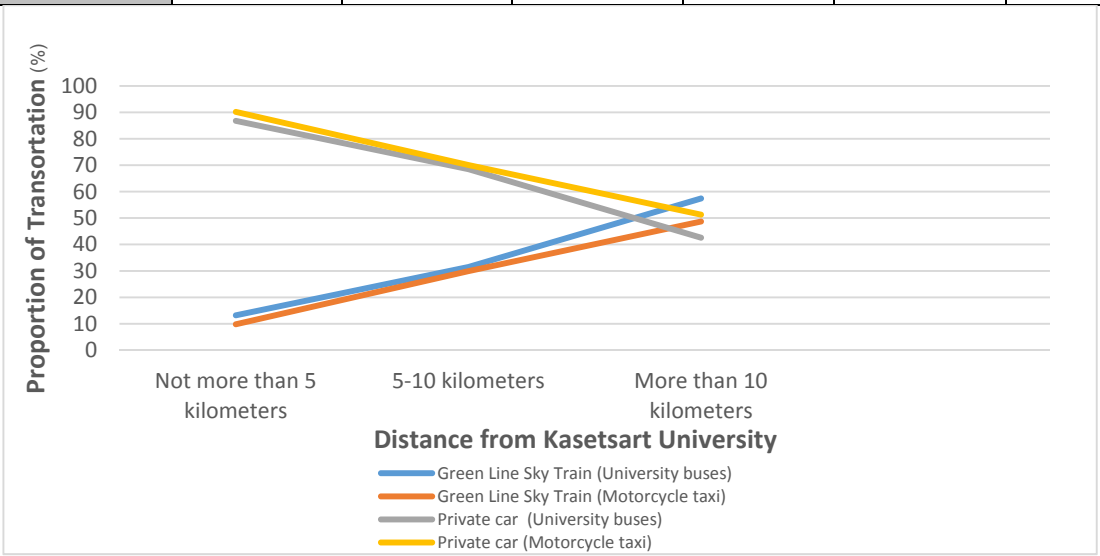


Figure 1 Predicted Share of Travel Mode Choice between Private Car and Green Line Sky Train to Kasetsart University

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาเพื่อหาค่าสัดส่วนการเลือกรูปแบบการเดินทางของรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้า (กรณีศึกษา) โดยเน้นกลุ่มตัวอย่างเป็นบุคลากรของมหาวิทยาลัยที่เดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคล จากวิเคราะห์ค่าสถิติเบื้องต้นพบว่ากลุ่มตัวอย่างมีอาชีพเป็นนิสิตเพียงร้อยละ 7.8 และมีวัตถุประสงค์ในการเดินทางมายังมหาวิทยาลัยเพื่อทำงานถึงร้อยละ 92.3%

แบบจำลอง Binary logit model ได้แสดงค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรด้านเวลาและค่าใช้จ่าย ดังเช่น สมการ $U_{\text{Private Car}}$ = 1.614 – 0.112 (TC) – 0.0828 (TT) ความถูกต้องของแบบจำลอง R-Square = 0.249, Log-Likehood = -1724.615, p-value = 0.000 เมื่อแทนค่าใช้จ่ายและเวลาจากการสร้างสถานการณ์สมมติ การเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อภายในทั้ง 2 รูปแบบ จะเห็นได้ว่าในระยะเดินทางใกล้ ๆ สัดส่วนของการใช้รถยนต์ส่วนบุคคลจะสูงกว่ารถไฟฟ้าค่อนข้างมากเนื่องจากค่าใช้จ่ายและเวลามีค่าใกล้เคียงกันแต่การเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคลจะมีความสะดวกสบายกว่า และเมื่อระยะทางเริ่มมากขึ้น

สัดส่วนของผู้เดินทางจะมาเลือกใช้บริการรถไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน เป็นผลมาจากผู้เดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลที่มีที่พักอาศัยอยู่ไกลประสบปัญหาในเรื่องของการจราจรติดขัดทำให้สูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับรถไฟฟ้าที่สามารถกำหนดเวลาและค่าใช้จ่ายได้ค่อนข้างแน่นอนทำให้ผู้เดินทางมีโอกาสที่จะตัดสินใจมาเลือกใช้บริการรถไฟฟ้ามากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำทฤษฎี วิธีการของการศึกษาวิจัย คณบดีและบุคลากรคณะต่างๆของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่อนุมัติและให้ความร่วมมือกับผู้เขียนได้ลงพื้นที่เก็บข้อมูลสำรวจแบบสอบถามครบถ้วนและสำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. 2558. โครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวช่วง หมอชิต – สะพานใหม่ – คูคตใน **รายงานการศึกษาและวิเคราะห์โครงการตามพระราชบัญญัติการให้เอกชนร่วมลงทุนในกิจการของรัฐ พ.ศ.2556**. การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

จตุพล รักดี. 2550. **แบบจำลองการเลือกใช้สถานที่จอดแล้วจรในเขตกรุงเทพมหานคร**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ณภัทร เลขะวัฒนะ และ ศิรดล ศิริธร. 2557. **การพัฒนาแบบจาลองการเลือกรูปแบบการเดินทางสำหรับนักเรียนระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคลและรถรับส่งนักเรียน**. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ปีที่ 9(1): หน้าที่ 61-67.

บริษัท ปตท. จำกัด. 2560. **ราคาน้ำมัน**. แหล่งที่มา: http://www.pttplc.com/th/getoilprice.aspx, 16 กรกฎาคม 2560.

วิโรจน์ รุโจปการ. 2544. **การวางแผนการขนส่งเขตเมือง**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์กรุงเทพมหานคร. 2560. **ข้อมูลสถิติจำนวนประชากรและพื้นที่รายเขตของกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2558**. แหล่งที่มา: https://www.bangkokgis.com/gis_information/population, 10 พฤศจิกายน 2560

สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์. 2551. **การวิเคราะห์ความต้องการเดินทาง (Travel Demand Analysis)**. แหล่งที่มา:http://www.surames.com/images/column_1227454933/chapter%203%20travel%20demand%20analysis.pdf, 18 พฤศจิกายน 2559

สำนักงานนโยบายและแผนการจราจรและขนส่ง. 2558. **ความเร็วรถในพื้นที่กรุงเทพหมานครประจำปี2558**. แหล่งที่มา: http://www.manager.co.th/Home/ViewNews.aspx?NewsID=9580000141625, 16 กรกฎาคม 2560.

Ben-Akiva, M. and Lerman, S.R. (1985) Discerete Choice Analysis: **Theory and Application to Travel Demand**, MIT Press.

การประยุกต์ใช้ข้อมูลตรวจวัด NO_2 ด้วยเซ็นเซอร์ดาวเทียม OMI ในประเทศไทย

Application of NO_2 Monitoring Data by OMI Satellite Sensor in Thailand

เบญจพร ปานเกิด[1] พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ[1] มณฑล ฐานุตตมวงศ์[1] และ พิชญ์นรี ลลิตาภรณ์[1*]

Benjaporn Pankerd[1], Peerakarn Banjerdkij[1], Monthon Thanuttamavong[1] and Pichnaree Lalitaporn[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการประยุกต์ใช้ข้อมูลมลพิษอากาศจากการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ดาวเทียม Ozone Monitoring Instrument (OMI) ในการศึกษาปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ในประเทศไทย ในช่วงปี พ.ศ.2555-2559 จากการศึกษาพบว่า OMI สามารถแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเดือนของปริมาณ NO_2 ในภาพรวมของประเทศไทยได้ โดยพบว่า NO_2 มีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคม นอกจากนี้การศึกษาข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (RH) อุณหภูมิ (Temp) และความเร็วลม (WS) ร่วมกับค่า OMI บริเวณพื้นที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะและโรงไฟฟ้าบางปะกงพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r) ระหว่างค่า OMI NO_2 กับค่า RH และ Temp มีค่าตั้งแต่ -0.06 ถึง -0.75 แสดงถึงความสัมพันธ์ในเชิงผกผัน กล่าวคือ เมื่อค่า RH และ Temp มีค่าสูงจะส่งผลให้ NO_2 มีค่าต่ำ นอกจากนี้พบว่าค่า r ระหว่าง OMI NO_2 กับค่า WS มีค่า 0.06-0.18 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงจะส่งผลให้ NO_2 มีค่าสูงขึ้น จากการเปรียบเทียบ OMI NO_2 กับผลการตรวจวัด NO_2 ภาคพื้นดินพบว่า บริเวณพื้นที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ค่า r มีค่า 0.79 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลจาก OMI นั้นมีแนวโน้มสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจติดตาม NO_2 ในประเทศไทยได้

ABSTRACT

This study applied air pollution data from Ozone Monitoring Instrument (OMI) to study nitrogen dioxides (NO_2) levels in Thailand during 2012-2016. This study showed that OMI is able to provide overall picture of monthly variability of NO_2 in Thailand. The result presented the highest level of NO_2 in March. The study of meteorological data; relative humidity (RH), temperature (Temp) and wind speed (WS), with OMI NO_2 in Mae Moh Power Plant and Bang Pakong Power Plant areas demonstrated that the correlation coefficients (r) between OMI NO_2 with RH and Temp range from -0.06 to -0.75 showing an inverse relationship that when RH and Temp are high, NO_2 levels are low. Moreover, the r values of OMI NO_2 and WS are 0.06-0.18. This refered that high WS increases NO_2 levels. The comparison of OMI NO_2 with ground monitoring NO_2 data in Mae Moh power plant area showed the r value of 0.79 meaning that OMI data are able to be applied for air quality monitoring over Thailand.

Key Words: NO_2, OMI, Satellite, Power plant, Thailand

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ข้อมูลคุณภาพอากาศโดยทั่วไปเป็นข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดินที่กระจายอยู่ ณ จุดที่ใกล้แหล่งกำเนิดมลพิษที่สำคัญ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดจะเป็นข้อมูลเฉพาะจุดที่มีการติดตั้งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ หากต้องการศึกษาในภาพรวมของทั้งพื้นที่หรือบริเวณที่สถานีตรวจวัดภาคพื้นดินเข้าไม่ถึง จำเป็นต้องมีการนำเครื่องมืออื่นมาประยุกต์ใช้ร่วมด้วย เช่น การใช้แบบจำลองคุณภาพอากาศ หรือการใช้ข้อมูลตรวจวัดดาวเทียม เป็นต้น

ดาวเทียมเป็นอีกหนึ่งเครื่องมือที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งข้อมูลจากดาวเทียมสามารถรวบรวมและนำมาวิเคราะห์ผ่านระบบคอมพิวเตอร์ทำให้ได้รับข้อมูลที่ทันสมัยตามช่วงเวลา สามารถนำไปใช้ประโยชน์ร่วมกับข้อมูลอื่นๆเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจุบันได้มีผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อนำผลการตรวจวัดจากดาวเทียมมาประเมินคุณภาพอากาศ เช่น Zia *et al.* (2014) ได้ศึกษาปริมาณ NO_2 ในพื้นที่ประเทศปากีสถาน โดยใช้ข้อมูลตรวจวัดจาก OMI ในช่วงปี พ.ศ.2547-2551 พบว่าค่าเฉลี่ย NO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 3.29% ต่อปี เช่นเดียวกับ Kim *et al.* (2015) ได้ศึกษาปริมาณ NO_2 ในพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยใช้ข้อมูลตรวจวัดจาก OMI ในช่วงปี พ.ศ.2548-2553 พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นในแต่ละปีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และหากเปรียบเทียบในแต่ละฤดูกาล พบว่า NO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูหนาว นอกจากนี้ Pichnaree *et al.* (2013) ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณ NO_2 โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม GOME SCIAMACHY OMI และ GOME-2 ในช่วงปี พ.ศ.2539-2555 พบว่า ปริมาณ NO_2 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางตะวันออกของประเทศจีน ซึ่ง NO_2 มีค่าสูงในฤดูหนาวและมีค่าต่ำในช่วงฤดูร้อน ซึ่งผลจากการศึกษานี้ทำให้เห็นว่าดาวเทียมสามารถแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มและการเปลี่ยนแปลงของมลพิษอากาศได้ในแต่ละฤดูกาล ดาวเทียมจึงถือว่าเป็นอีกเครื่องมือหนึ่งที่น่าสนใจและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

สำหรับการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของ NO_2 โดยใช้ข้อมูลตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ดาวเทียม OMI พร้อมศึกษาร่วมกับข้อมูลจากผลการตรวจวัดภาคพื้นดิน ได้แก่ NO_2 RH Temp และ WS โดยทำการศึกษา NO_2 ที่บริเวณโรงไฟฟ้า เนื่องจาก NO_2 ถือเป็นหนึ่งในมลพิษหลักของกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับพื้นที่โรงไฟฟ้าที่สนใจศึกษาคือ โรงไฟฟ้าแม่เมาะและโรงไฟฟ้าบางปะกง ซึ่งถือเป็นโรงไฟฟ้าหลักที่ผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศไทย

อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

ข้อมูลตรวจวัดด้วยดาวเทียม

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลตรวจวัด NO_2 (molecule/cm^2) จากอุปกรณ์ OMI ที่ถูกติดตั้งบนดาวเทียม AURA ขององค์การ NASA โดย OMI เริ่มตรวจวัดตั้งแต่ปี พ.ศ.2548 จนถึงปัจจุบัน มีช่วงคลื่นของการตรวจวัดที่ 270-500 nm ช่วงเวลาตรวจวัด 13.40-13.50 น. ที่ระดับความสูงจากพื้นดินประมาณ 700 กิโลเมตร ข้อมูล NO_2 จาก OMI สามารถสืบค้นเพิ่มเติมได้ที่เว็บไซต์ของ Tropospheric Emission Monitoring Internet Service (www.temis.nl)

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลรายเดือน ในช่วงปี พ.ศ.2555-2559 ของ OMI ที่ครอบคลุมทั้งประเทศไทยและข้อมูลเฉพาะจุด ดังแสดงใน Figure 1 ได้แก่

- บริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ พิกัดตรวจวัดที่ Latitude 18.125-18.625 °N และ Longitude 99.500-100.000 °E
- บริเวณโรงไฟฟ้าบางปะกง พิกัดตรวจวัดที่ Latitude 13.125-13.625 °N และ Longitude 100.500-101.000 °E

ข้อมูลตรวจวัดภาคพื้นดิน

ใช้ข้อมูลตรวจวัดจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินของกรมควบคุมมลพิษ (Pollution Control Department, PCD) ได้แก่ ปริมาณ NO_2 (ค่าเฉลี่ย 3 ชั่วโมง 12.00-15.00 น.) และค่าอุตุนิยมวิทยา (ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง) ได้แก่ RH Temp และ WS โดยใช้ค่าเฉลี่ยรายเดือน ในช่วงปี พ.ศ.2555-2559 แบ่งเป็น

- บริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ใช้สถานีตรวจวัดโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพบ้านสบป้าด จังหวัดลำปาง Latitude 18.25 °N และ Longitude 99.77 °E เป็นตัวแทนสำหรับพื้นที่ศึกษา
- บริเวณโรงไฟฟ้าบางปะกง ใช้สถานีสำนักงานสามัญศึกษา Latitude 13.213 °N และ Longitude 100.590 °E (พ.ศ.2555-2557) และสถานีสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค 13 จังหวัดชลบุรี Latitude 13.211 °N และ Longitude 100.583 °E (พ.ศ.2559)

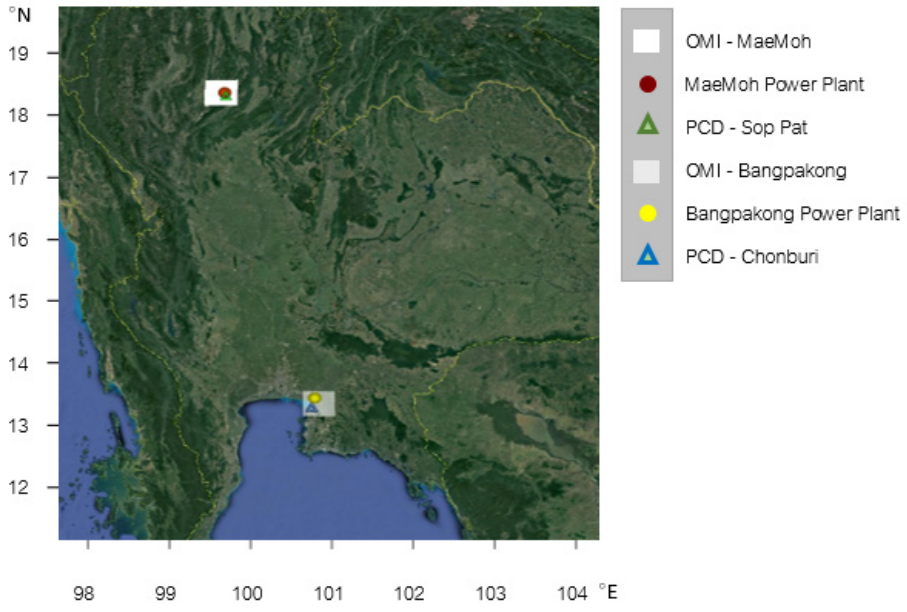


Figure 1 Study areas of Mae Moh Power Plant and Bang Pakong Power Plant

ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

<u>การกระจายตัวของ NO_2 ในประเทศไทย</u>

Figure 2 แสดงลักษณะการกระจายตัวของ NO_2 ในประเทศไทย จากข้อมูลดาวเทียม OMI ในปี พ.ศ.2559 ซึ่งพบว่าแผนภาพที่ได้จากดาวเทียม OMI สามารถแสดงถึงการกระจายตัวและแนวโน้มปริมาณ NO_2 ในแต่ละเดือนของบริเวณพื้นที่ประเทศไทยได้ โดยพบว่าพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีปริมาณ NO_2 สูง

ตลอดทั้งปี ทั้งนี้เนื่องมาจากกรุงเทพมหานครมีแหล่งกำเนิด NO_2 ค่อนข้างมาก เช่น การใช้รถยนต์ รถจักรยานยนต์ อีกทั้งมีโรงงานอุตสาหกรรมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จึงส่งผลให้บริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีปริมาณ NO_2 สูงกว่าในพื้นที่อื่นตลอดทั้งปี นอกจากนี้ยังพบว่าในบางพื้นที่ของประเทศไทย เช่น พื้นที่บริเวณจังหวัดสระบุรี ลำปาง และระยอง เป็นต้น มีแหล่งกำเนิด NO_2 ที่สำคัญ เนื่องจากสามารถสังเกตเห็นได้จากแผนภาพอย่างชัดเจน ทั้งนี้พื้นที่ของจังหวัดดังกล่าวมีโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าตั้งอยู่ทำให้ปริมาณ NO_2 มีปริมาณที่ค่อนข้างสูงกว่าในพื้นที่อื่นของประเทศไทย

จากภาพรวมของปริมาณ NO_2 ที่ปรากฏครอบคลุมพื้นที่ตลอดทั้งปี แสดงให้เห็นว่า NO_2 เป็นก๊าซที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ โดยแนวโน้มปริมาณ NO_2 ในประเทศไทยนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับประเทศอื่นๆ ที่อยู่บริเวณใกล้เคียง เมื่อพิจารณาแนวโน้มในแต่ละเดือนของปีพบว่า NO_2 มีปริมาณสูงในช่วงฤดูแล้ง โดยมีค่าสูงสุดช่วงเดือนมีนาคมและเดือนเมษายน ทั้งนี้เนื่องมาจากมลพิษจากการเผาไหม้ชีวมวลในภาคเหนือเป็นหลัก ซึ่งบางส่วนอาจเป็นผลมาจากการเผาไหม้ทางการเกษตรหรือการเกิดไฟป่าทั้งในประเทศไทยเองและจากประเทศเพื่อนบ้าน ปริมาณ NO_2 มีแนวโน้มลดลงในช่วงฤดูฝน ตั้งแต่เดือนมิถุนายนเป็นต้นไป

<u>ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ NO_2 จาก OMI และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา</u>

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ NO_2 จาก OMI บริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะและโรงไฟฟ้าบางปะกง ในช่วงปี พ.ศ.2555-2559 พบว่ามีแนวโน้มค่อนข้างเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูแล้ง (ช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนเมษายน) และมีแนวโน้มลดลงในช่วงฤดูฝน (ช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม) ดังแสดงให้เห็นใน Figure 3a เนื่องจากในช่วงฤดูฝน น้ำฝนจะเจือจางและชะมลพิษที่อยู่ในอากาศให้ตกลงมาทำให้ปริมาณมลพิษในอากาศมีความเข้มข้นลดลง สอดคล้องกับค่า r ระหว่าง NO_2 จาก OMI และค่า RH ที่มีค่า -0.75 บริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และ -0.06 บริเวณโรงไฟฟ้าบางปะกง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า RH หรือค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เป็นผลจากปริมาณฝน แปรผกผันกับปริมาณ NO_2 ในอากาศ ทำให้ในช่วงฤดูฝนปริมาณ NO_2 ในอากาศต่ำกว่าช่วงฤดูแล้ง ผลจากการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของกรรณิกา จันทะล่าม (2558) ที่ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมลสารทางอากาศกับสภาพทางอุตุนิยมวิทยาโดยพบว่าความเข้มข้นของมลพิษอากาศทุกชนิดในฤดูฝนมีค่าต่ำกว่าในฤดูร้อนเนื่องจากฝนที่ตกและการเจือจางของน้ำฝน สำหรับปัจจัยด้านอุณหภูมิ ดังที่แสดงใน Figure 3b เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณ NO_2 มีแนวโน้มลดลง ซึ่งค่า r ระหว่าง NO_2 จาก OMI และค่า Temp มีค่า -0.12 บริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะและ -0.15 บริเวณโรงไฟฟ้าบางปะกง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากช่วงที่อุณหภูมิสูง NO_2 เกิดปฏิกิริยาที่เร็วขึ้น ทำให้ NO_2 ถูกเปลี่ยนเป็นสารมลพิษอื่น (ธนิกานต์, 2549) เช่น NO_2 ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในที่ที่มีแสงแดดหรืออุณหภูมิสูงสามารถทำปฏิกิริยาและเกิดเป็นก๊าซโอโซน (Ozone) ได้ ทำให้ความเข้มข้นของ NO_2 ในอากาศน้อยลง ดังนั้นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกปลดปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดมลพิษ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม สามารถส่งผลต่อปริมาณ NO_2 ได้เช่นกัน ในส่วนของความเร็วลม ดังที่แสดงใน Figure 3c ค่า r ระหว่าง NO_2 จาก OMI และ WS มีค่า 0.06 บริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะและ 0.18 บริเวณโรงไฟฟ้าบางปะกง แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมที่สูงขึ้นในบริเวณนี้มีผลทำให้ปริมาณ NO_2 ค่อนข้างเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในการพิจารณาอิทธิพลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อปริมาณมลพิษในอากาศให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นนั้น ในอนาคตควรมีการนำข้อมูลทิศทางลม ความสูงปล่องควัน ความสูงผสม (Mixing Height) และแหล่งกำเนิดมลพิษอื่นที่อยู่โดยรอบพื้นที่ที่สนใจมาพิจารณาร่วมด้วย

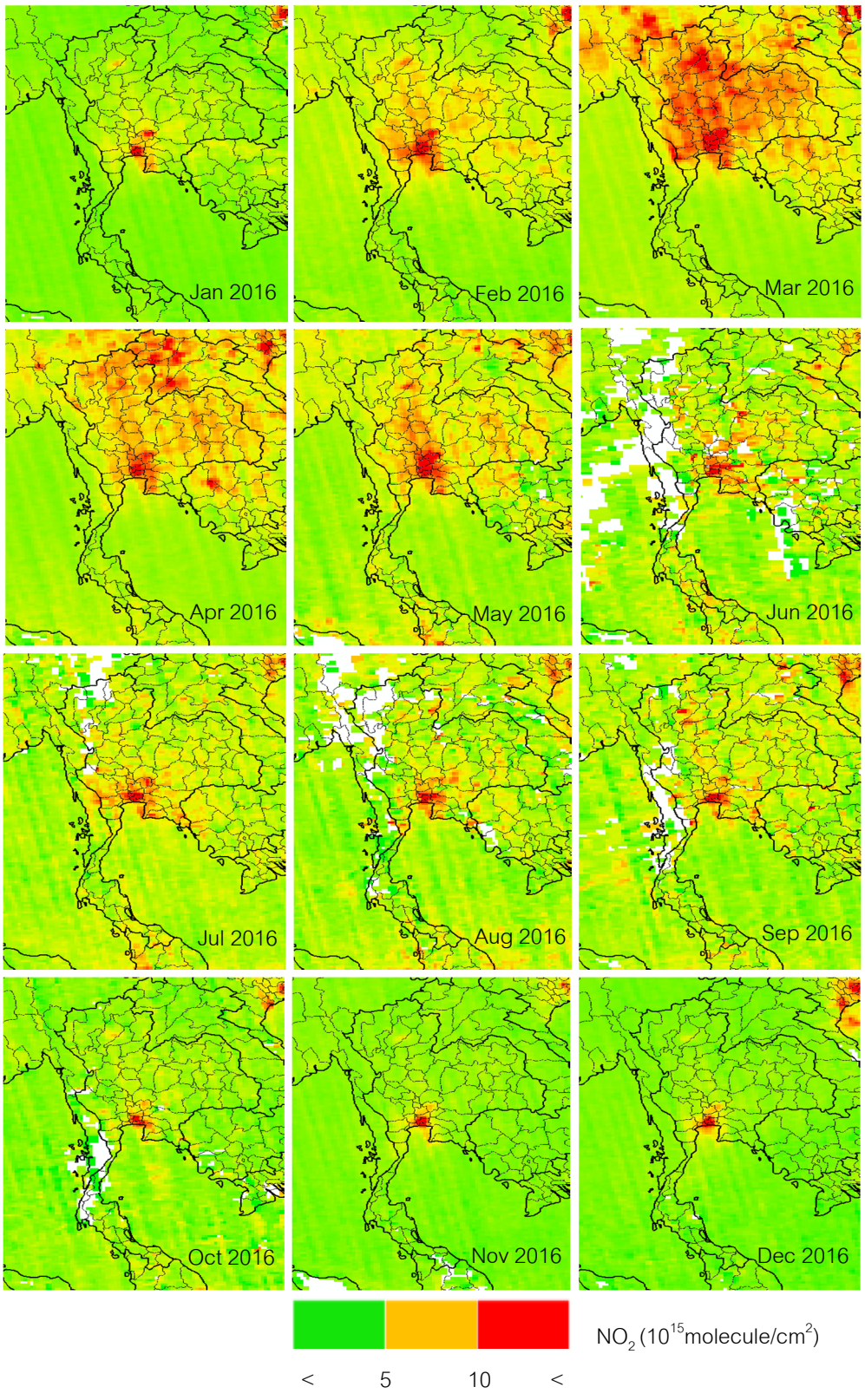


Figure 2 Monthly distribution of NO_2 over Thailand from OMI in 2016

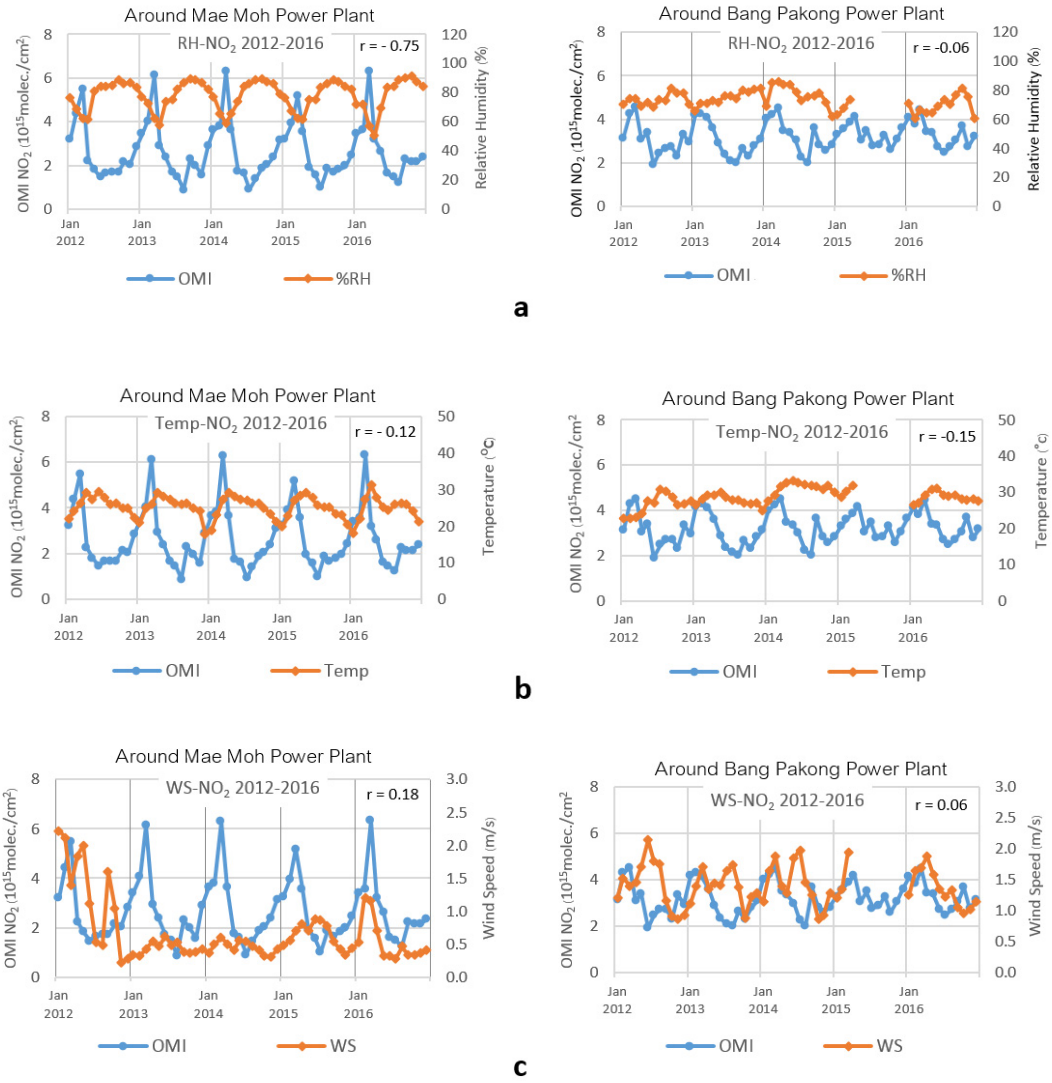


Figure 3 The relationship of OMI NO_2 and meteorological data including relative humidity (a) temperature (b) and wind speed (c) around Mae Moh Power Plant and Bang Pakong Power Plant from 2012 to 2016

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ NO_2 จาก OMI และสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน

Figure 4a แสดงความสัมพันธ์รายเดือนระหว่างปริมาณ NO_2 จาก OMI กับผลความเข้มข้นของ NO_2 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินของกรมควบคุมมลพิษ (PCD) บริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ณ สถานีตรวจวัดโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพบ้านสบป้าด จังหวัดลำปาง ในช่วงปี พ.ศ.2555-2559 โดยพบว่าลักษณะข้อมูลมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่า r ระหว่างค่า NO_2 จาก OMI และ PCD พบว่ามีค่า 0.79 แสดงถึงความสอดคล้องของข้อมูลจาก OMI และจากผลการตรวจวัดภาคพื้นดิน และจาก Figure 4b บริเวณโรงไฟฟ้าบางปะกง ณ สถานีสำนักงานสามัญศึกษา (พ.ศ.2555-2557) และสถานีสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค 13 จังหวัดชลบุรี (พ.ศ.2559) พบว่าค่า r มีค่า 0.17 แสดงถึงความสอดคล้องในทางบวกของข้อมูล แต่ความสอดคล้องน้อยกว่าบริเวณพื้นที่ศึกษาโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะภูมิประเทศของโรงไฟฟ้าบางปะกง

ที่เป็นพื้นที่ใกล้ทะเล ซึ่งอาจทำให้อิทธิพลจากปัจจัยอื่น เช่น ลมทะเลและพายุฝน เข้ามาเป็นปัจจัยที่ทำให้ความสอดคล้องของข้อมูลที่ได้จากบริเวณพื้นที่โรงไฟฟ้าบางปะกงน้อยกว่าพื้นที่บริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งตั้งอยู่บนแผ่นดินใหญ่ (Heckel *et al*., 2011; Tzortziou *et al*., 2014)

เมื่อพิจารณาปริมาณ NO_2 ที่ได้จาก OMI และจากผลตรวจวัดภาคพื้นดิน พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณ NO_2 บริเวณพื้นที่โรงไฟฟ้าบางปะกง (OMI=3.19 molecule/cm^2, PCD=15.02 µg/m^3) สูงกว่าพื้นที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ (OMI=2.63 molecule/cm^2, PCD=3.80 µg/m^3) ทั้งนี้เนื่องมาจากจุดตรวจวัดที่ใกล้ที่สุดที่ใช้เป็นตัวแทนของโรงไฟฟ้าบางปะกงอยู่ในจังหวัดชลบุรี ซึ่งจุดนี้มีแหล่งกำเนิดมลพิษอื่นที่อยู่โดยรอบมากกว่าพื้นที่ที่ใช้เป็นตัวแทนของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ทำให้ค่าเฉลี่ยปริมาณ NO_2 ของพื้นที่โรงไฟฟ้าบางปะกงมากกว่าโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

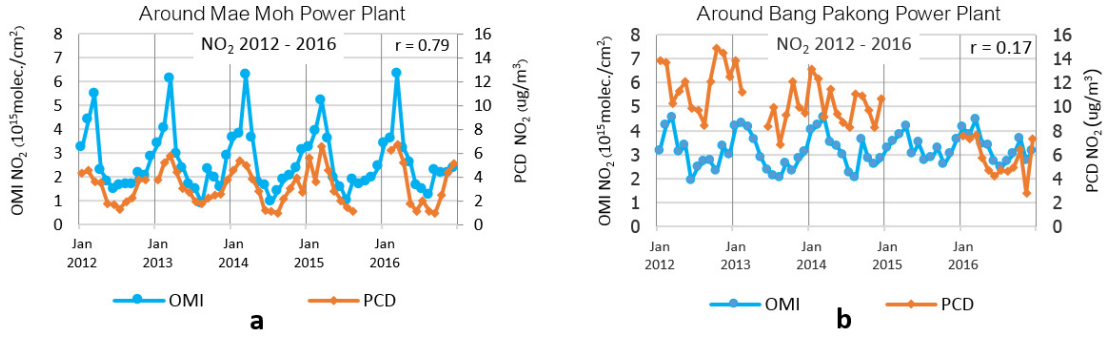


Figure 4 The relationship between OMI NO_2 and PCD NO_2 around Mae Moh Power Plant (a) and Bang Pakong Power Plant (b) from 2012 to 2016

สรุป

การศึกษานี้ได้ทำการศึกษา NO_2 จาก OMI บริเวณประเทศไทยเป็นเวลา 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ.2555-2559 แผนภาพที่ได้จาก OMI แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ NO_2 ในแต่ละเดือน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า NO_2 มีค่าสูงสุดในช่วงฤดูแล้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเดือนมีนาคมและบริเวณภาคกลางของประเทศไทย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลจาก OMI กับผลตรวจวัดภาคพื้นดิน พบว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดภาคพื้นดิน ได้แก่ ค่า NO_2 RH Temp และ WS บริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความสอดคล้องกับ OMI NO_2 มากกว่าผลการตรวจวัดบริเวณโรงไฟฟ้าบางปะกงซึ่งตั้งอยู่ใกล้ทะเล โดยในภาพรวมของประเทศไทยพบว่า NO_2 มีค่าสูงขึ้นเมื่อ RH และ Temp มีค่าต่ำ ซึ่งตรงกับช่วงฤดูแล้งของประเทศไทย

จากการศึกษานี้พบว่าการตรวจวัดด้วยดาวเทียมมีแนวโน้มสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจติดตาม NO_2 ร่วมกับการตรวจวัดภาคพื้นดินในประเทศไทยได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจุดที่สถานีตรวจวัดภาคพื้นดินเข้าไม่ถึง อย่างไรก็ตามสำหรับการศึกษาในอนาคต ควรมีการศึกษาข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยดาวเทียมร่วมกับข้อมูลภาคพื้นดินในพื้นที่อื่นของประเทศไทย รวมทั้งควรมีการนำข้อมูลอุตุนิยมวิทยาอื่น เช่น ทิศทางลมและความสูงผสมมาพิจารณาร่วมด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งกรมควบคุมมลพิษที่ให้ข้อมูล NO_2 และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และโครงการ Tropospheric Emission Monitoring Internet Service (TEMIS) สำหรับข้อมูลตรวจวัด NO_2 ด้วยเซ็นเซอร์ดาวเทียม OMI ในประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

กรรณิกา จันทะล่าม, นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, คณิตา ตังคณานุรักษ์ และปัญญา แขน้ำแก้ว. 2558. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมลสารทางอากาศ กับสภาพอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่เขตดินแดงและเขตลาดพร้าว. **AEE-T Journal of Environmental Education** 6(12): 9-18.

ธนิกานต์ ลาภาพิพัฒน์. 2549. **ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโอโซนกับสารตั้งต้นและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.

A. Heckel, S.-W. Kim, G. J. Frost, M. Trainer and J. P. Burrows. 2011. Influence of low spatial resolution a priori data on tropospheric NO_2 satellite retrievals. **Atmospheric Measurement Techniques** 4, 1805-1820, 2011.

Deok-Rae Kim, Jae-Bum Lee, Chang Keun Song, Seung-Yeon Kim, Young-Il Ma, Kyung-Mi Lee, Jun-Seok Cha and Sang-Deok Lee. 2015. Temporal and spatial distribution of tropospheric NO_2 over Northeast Asia using OMI data during the years 2005-2010. **Atmospheric Pollution Research** 6(2015): 768-777.

Maria Tzortziou, Jay R. Herman, Ziauddin Ahmad, Christopher P. Loughner, Nader Abuhassan and Alexander Cede. 2014. Atmospheric NO_2 dynamics and impact on ocean color retrievals in urban nearshore regions. **American Geophysical Union** 119, 3834-3854.

Pichnaree Lalitaporn, Gakuji Kurata, Yuzuru Matsuoka, Narisara Thongboonchoo and Vanisa Surapipith. 2013. Long-term analysis of NO_2, CO, and AOD seasonal variability using satellite observations over Asia and intercomparison with emission inventories and model. **Air Qual Atmos Health** (2013) 6: 655-672.

Zia ul-Haq, Salman Tariq, Muhammad, Khalid Mahmood, Syeda Adila Batool and Asim Daud Rana. 2014. A study of tropospheric NO_2 variability over Pakistan using OMI data. **Atmospheric Pollution Research** 5(2014): 709-720.

ผลของสารเติม Mn^{2+} and Fe^{2+} ที่มีต่อการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียและการเกิดผลิตภัณฑ์ของแข็งระหว่างการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้น้ำทะเลผสมแอมโมเนีย

Effect of Mn^{2+} and Fe^{2+} Additives on Ammonia Suppression and Solid Product Formation during CO_2 Capture using Ammoniated Seawater

สุภาพร ผลิตสกุล[1,2] ธีรภัทร์ ยงชูยศ[1] พศวัต ศรีสันต์[1] และ กานดิส สุดสาคร[1,2*]

Supaphorn palitsakun[1,2], Theeraphat Yongchuyot[1], Posawat Srisan[1] and Kandis Sudsakorn[1,2*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียโดยการเติมไอออนโลหะเหล็ก (Fe^{2+}) และแมงกานีส (Mn^{2+}) และศึกษาผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับ CO_2 ได้จากกระบวนการปิโตรเลียมนอกชายฝั่ง โดยใช้สารละลายผสมของ NaCl NH_4OH $FeCl_2$ และ $MnCl_2$ เป็นตัวทดสอบปฏิกิริยาในปฏิกรณ์แบบฟองก๊าซ พบว่าการเติม Fe^{2+}และ Mn^{2+} ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึม CO_2 ได้มากขึ้นกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมโลหะใดเลย นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมโลหะ Fe^{2+} ให้ประสิทธิภาพดีกว่า Mn^{2+} (70% > 60%) ที่ความเข้มข้น 0.03 mol/L เนื่องจาก Fe^{2+} ทำหน้าที่ดักจับ CO_2 ด้วยไม่ใช่เพียงแค่เหนี่ยวรั้งแอมโมเนียในระบบ ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์เพราะจะทำให้สารเหนี่ยวรั้งหายไปจากระบบและต้องเติมเพิ่มเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณ Fe^{2+} กลับพบว่ามีการสูญเสียแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน ผลการศึกษานี้จึงแนะนำให้เลือกใช้สารเหนี่ยวรั้งเป็น Mn^{2+} ซึ่งแม้จะให้ประสิทธิภาพในการดักจับ CO_2 น้อยว่าแต่มีแนวโน้มในการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Mn^{2+} ที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

ABSTRACT

This research aims to study the ammonia loss inhibition by adding Fe^{2+} compared to Mn^{2+} and studies the effect of additives on the capture efficiency of CO_2 emitted from offshore petroleum production sites. All chemicals (NaCl, NH_4OH, $FeCl_2$ and $MnCl_2$) were mixed and reacted to CO_2 gas bubble reactor. The results showed that Fe^{2+} or Mn^{2+} addition could help increasing CO_2 capture efficiency as compared to system without any additive. Moreover, it was also found that addition of Fe^{2+} resulted in a better CO_2 capture efficiency than of Mn^{2+} (70% > 60%) at the same concentration (0.03 mol/L). This was because Fe^{2+} acted to capture CO_2 itself, not only suppress ammonia in the system. This characteristic was unpleasant due to the loss of inhibitor from the system and a lot of make up would be needed. In addition, increasing Fe^{2+} concentration was found to significantly increase ammonia loss. Mn^{2+} was suggested as a proper inhibitor. Although the Mn^{2+} showed lower CO_2 capture efficiency but there was a trend of increasing ammonia inhibition with increasing Mn^{2+} concentration.

Keywords: carbon dioxide absorption, ammonia, suppression, additive, iron, manganese

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ

[2]Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology

คำนำ

การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการใช้กระบวนการดูดซึมด้วยสารเคมี (Chemical Absorption) ด้วยสารละลายแอมโมเนีย (Peng, Y. *et al*., 2012) เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายถึงประสิทธิภาพที่ดีในการดักจับ แต่อย่างไรก็ตามแอมโมเนียเป็นสารที่ระเหยง่ายทำให้เกิดปัญหาการระเหยของแอมโมเนียออกจากระบบ ส่งผลให้จับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ลดลงด้วยและต้องมีการเติมสารแอมโมเนียเข้าไปเพิ่ม (Ammonia make-up) เพื่อทดแทนปริมาณที่สูญเสีย จากปัญหานี้ได้เริ่มมีงานวิจัยเกี่ยวกับการป้องกันการระเหยของแอมโมเนียด้วยการเติมสารเคมีต่างๆ เพื่อช่วยเหนี่ยวรั้ง (Suppression) หรือเกิดพันธะกับแอมโมเนียป้องกันการหลุดออกของแอมโมเนียสู่บรรยากาศ ซึ่งการเติมโลหะทรานส์ซิชันบางชนิด เช่น Cu, Ni และ Co (Kim, Y. *et al*., 2012;Shuangchen, M. *et al*., 2015;Shuangchen, M. *et al*., 2013) เกิดเป็นโครงสร้างเชิงซ้อน (Complex) ช่วยเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียด้วยพันธะที่แข็งแรง ลดปัญหาการหลุดออกของแอมโมเนียได้ดี (Li *et al.,* 2014) นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่เคยมีรายงานเกี่ยวกับการเติมโลหะทรานส์ซิชันในระบบที่มีแอมโมเนียร่วมกับน้ำทะเลมาก่อน จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะทำการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพในการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียและดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งผลกระทบที่มีต่อการเกิดผลิตภัณฑ์สารประกอบที่ได้จากการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม

โดยงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาอิทธิพลของไอออนของโลหะทรานส์ซิชัน แมงกานีส (Mn^{2+}) และเหล็ก (Fe^{2+}) เนื่องจากโลหะทั้งสองมีคุณสมบัติในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีเทียบเท่าโคบอลต์ซึ่งเป็นโลหะที่ให้ประสิทธิภาพการเหนี่ยวรั้งที่ดี แต่มีราคามีราคาถูกกว่าโลหะโคบอลต์ และเป็นธาตุที่หาง่ายกว่าอีกด้วย นับเป็นแรงจูงใจที่ดีในเชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อยับยั้งการระเหยของแอมโมเนีย โดยมุ่งศึกษาหาชนิดและปริมาณของโลหะทรานซิชันที่เหมาะและสามารถลดการสูญเสียแอมโมเนียได้ดี และในขณะเดียวกันยังสามารถคงประสิทธิภาพสูงในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังต้องการศึกษาผลของสารเติมที่มีต่อการกระจายตัว และการเกิดผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้ไปต่อยอดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงสำหรับการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แหล่งผลิตปิโตรเลียมนอกชายฝั่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายและการทดสอบปฏิกิริยา

ผสมสารละลาย NH_4OH ความเข้มข้น 1 wt% กับ NaCl 3.5 wt% (ปริมาณเกลือโดยสัดส่วนเทียบเท่าน้ำทะเลจริง) และสารละลาย $FeCl_2$ หรือ $MnCl_2$ ที่ความเข้มข้น (0.01, 0.02 และ 0.03 mol/l) ให้มีปริมาตรรวม 700 ml แล้วนำไปทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองก๊าซ (Bubble reactor) ขนาด 1000 ml และทำการทดสอบแบบกึ่งเฉพาะงวด (Semi-batch) โดยความคุมสภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 20 ºC อัตราการไหลของก๊าซ CO_2 เท่ากับ 200 ml/min (MFC model:GFC17) ความดัน 1 บรรยากาศ และทำการวัดปริมาณ CO_2 ที่ทางออกด้วย CO_2-IR sensor (Model:COZIR-WR-100) และตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียด้วยวิธีไมโครคเจลดาห์ล (Micro Kjeldahl method) นอกจากนี้ยังตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วย เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) และ Atomic Absorption (AA) เพื่อตรวจสอบปริมาณที่เหลืออยู่ของไอออนในสารละลาย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

อิทธิพลของชนิดสารเติมโลหะ (Fe^{2+} และ Mn^{2+}) และปริมาณการเติมต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบของสารละลายแอมโมเนียและน้ำทะเล

จากผลการทดสอบพบว่าการเติมโลหะทรานซิชัน Fe^{2+} และ Mn^{2+} ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่เติมโลหะใดๆเลย ทั้งนี้เป็นเพราะโลหะ Fe^{2+} และ Mn^{2+} ไปช่วยเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียให้อยู่ในสารละลาย ไม่ระเหยออกไปในรูปแก๊สสู่บรรยากาศ (Liquid to gas phase) จึงทำให้มีแอมโมเนียมากพอ (High capacity) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีในระบบและช่วยให้ประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น (High efficiency) ตามสมมติฐานของงานและสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆที่มีมาก่อนหน้า (Shuangchen, M. *et al*., 2015;Shuangchen, M. *et al*., 2013) ช่วยเพิ่มโดย Fe^{2+} ให้ประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 70% ซึ่งมีค่าสูงกว่า Mn^{2+} ที่มีค่าเท่ากับ 60% (Figure 1) ตามลำดับ โดยที่ในส่วนของปริมาณการเติมโลหะที่ 0.01, 0.02 และ 0.03 mol/l นั้น สำหรับโลหะ Fe^{2+} จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 55.98%, 59.57% และ 69.39% ตามลำดับที่เพิ่มขึ้นของ Fe แต่อย่างไรก็ตามในการทำปฏิกิริยาพบว่าในการใช้เหล็กเป็นตัวเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียนั้นยังมีการตกตะกอนออกมาถึงแม้ว่าจะน้อยมาก เมื่อเพิ่มปริมาณ Fe โดยตะกอนดังกล่าวไปตรวจสอบและพบว่าสอดคล้องกับปริมาณที่ใส่ลงต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะกล่าวถึงผลวิเคราะห์ในเรื่องนี้ในส่วนถัดไปที่หัวข้อการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ ในขณะที่โลหะ Mn^{2+} มีประสิทธิภาพในการดักจับที่ต่ำกว่า Fe^{2+} แต่ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เติมลงไปดังนี้ 59.60%, 62.90% และ 61.45% ตามลำดับ ยังเกิดการตะกอนที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับการใช้ Fe^{2+}

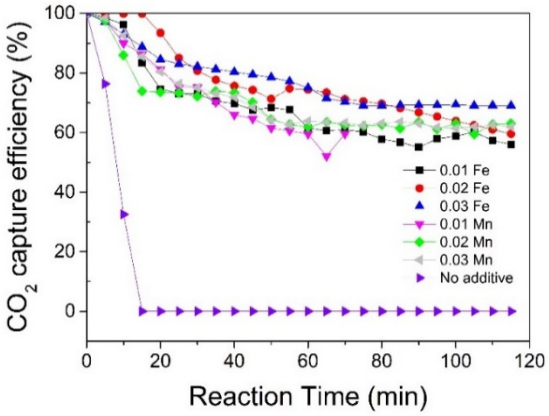


Figure 1 Effect of additive type (Fe^{2+} and Mn^{2+} metal) on CO_2 capture efficiency

อิทธิพลของสารเติมชนิดโลหะ (Fe^{2+} และ Mn^{2+}) และปริมาณต่อประสิทธิภาพการเหนี่ยวรั้งการหลุดออกของแอมโมเนียในระบบ

สารละลายภายหลังการทำปฏิกิริยาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียหรือการยับยั้งการหลุดออกของแอมโมเนียจากระบบ (Ammonia suspession/ammonia loss) โดยวิธีการกลั่นและไทเทรตด้วยเทคนิค Kjeldahl method เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียแอมโมเนีย พบว่า การเติมโลหะทรานซิชันช่วยลดการสูญเสียแอมโมเนียเมื่อเทียบกับการไม่เติมตัวยับยั้งเลย ทั้งนี้เพราะธรรมชาติของหมู่ฟังชันของแอมโมเนีย (NH_2) จะรวมกลุ่มกับฟังก์ชันของน้ำ (OH^-) ได้ดีเป็นการเกิดพันธะ H-bond ที่เกาะกันอย่างหลวมๆ ทำให้เกิดการหลุดออกได้ง่ายจากการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ ดังนั้น

จึงมีการพัฒนาใช้งานโลหะทรานส์ซิชันบางชนิดเติมผสมเพื่อเหนี่ยวรั้งการหลุดออกของแอมโมเนีย (Shuangchen, M. *et al*., 2013) ซึ่งพบว่าแอมโมเนีย เกิดเป็นโครงสร้างเชิงซ้อน (Complex) ซึ่งมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่า ช่วยลดปัญหาการหลุดออกของแอมโมเนียได้ดี (Li, K. *et al*., 2014) โดยที่โลหะจะไปเกิดเป็นคอมเพล็กซ์กับแอมโมเนีย (Metal-ammonia complex) ในรูป $M(NH_3)_6^{2+}$ (M คือ โลหะทรานซิชัน) ซึ่งยึดกันด้วยพันธะที่แข็งแรง ดังสมการที่ 1 และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมโมเนียกับโลหะยังทำหน้าที่เป็นสารตัวกลาง (media) ในการเกิดสารประกอบคาร์บอเนต ดังแผนภาพ (Figure 2) โดยโลหะทรานส์ซิชัน Fe และ Mn นั้นมี Co-ordination number คือ 6 ทำให้มี Ligands ของแอมโมเนียมาจับได้ถึง 6 โมเลกุล เกิดเป็นรูปร่าง Octahedral shape สามารถจับโมเลกุลของแอมโมเนียได้ดี ดังนั้นทำให้การหลุดออกเป็นแก๊สที่ง่ายของแอมโมเนียเกิดขึ้นได้ยากมากขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่เติมโลหะ

$$M^{2+}\ (aq) + 6NH_3\ (aq) \leftrightarrow M(NH_3)_6^{2+}(aq)(complex) \qquad (1)$$

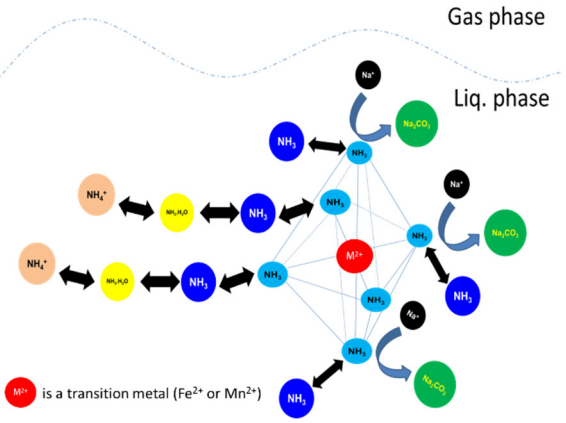


Figure 2 Inhibiting ammonia escape mechanism using M^{2+} (Fe^{2+} or Mn^{2+}) and reaction with CO_2-NaCl solution (Modifiled from (Shuangchen, M. *et al*., 2013))

จากผลของการเติมโลหะทรานซิชันนั้นพบว่า Mn^{2+} มีประสิทธิภาพการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียที่ดีในช่วง 0.01-0.02 mol/l ซึ่งอาจเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน และจะมีค่าต่ำลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 0.03 mol/l ในขณะที่เติมโลหะ Fe^{2+} เติมเพิ่มมากขึ้นจะมีประสิทธิภาพการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียมีค่าลดลง (Figure 3) สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การสูญเสียแอมโมเนียทั้งนี้อาจเป็นเพราะในระบบที่มีการเติมโลหะ Fe จะเกิดการสูญเสียโลหะ Fe ส่วนหนึ่งไปกับการเกิดตะกอน ทำให้สูญเสียจำนวนคอมแพลกซ์ระหว่าง Fe-NH_3 บางส่วน เลยทำให้แอมโมเนียเกิดการหลุดออกไปเป็นก๊าซมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Fe จนถึง 0.03 mol/l ปริมาณการยับยั้งการสูญเสียแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นและใกล้เคียงกับการเติมโลหะ Mn ที่ความเข้มข้นเท่ากันคือ 0.03 mol/l ซึ่งเป็นไปได้ว่าเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กเพื่อยับยั้งแอมโมเนีย แต่อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินการคือการเกิดตะกอนจำนวนมากขึ้นเพิ่มตามมาจากปริมาณที่มากขึ้นของการเติมโลหะเหล็ก ซึ่งอาจเป็นปัญหาต่อการนำไปใช้จริง

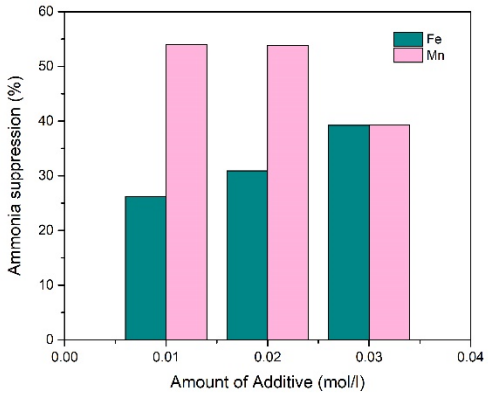


Figure 3 Effect of additive type (Fe^{2+} and Mn^{2+} metal) on ammonia suppression

ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของแข็ง-ของเหลวที่เกิดขึ้นหลังสิ้นสุดการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากการแยกตะกอนที่ได้ในระบบไปตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD พบว่าสารประกอบเกิดขึ้นเป็นตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นสารประกอบคาร์บอเนตในกรณีของการเติมโลหะ Mn^{2+} พบว่าสารประกอบที่พบโดยส่วนใหญ่นั้นเป็นสารประกอบในรูป $MnCO_3$ เด่นชัดแต่ไม่พบเฟสของ NaCl อย่างชัดเจน ในขณะที่โลหะ Fe^{2+} นั้นจะพบทั้งเฟสของสารประกอบ $FeCO_3$, Fe_2O_3 ซึ่งได้มาจากการเปลี่ยนเฟสของ $FeCO_3$ เมื่อได้รับความร้อนที่ 110 ºC นอกจากนี้ยังพบเฟสของ NaCl ที่ปรากฏอย่างชัดเจนซึ่งคาดว่าเป็น NaCl ที่ไม่ทำปฏิกิริยาจากในระบบ (Figure 4) นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณโลหะทั้ง 2 ชนิด ให้ผลแนวโน้มการเกิดตะกอนที่ตรงข้ามกัน โดยโลหะ Mn^{2+} มีแนวโน้มที่จะเกิดตะกอนลดลงเมื่อความความเข้มข้นของสารละลายซึ่งตรงข้ามกับโลหะ Fe^{2+} (Figure 5) จึงอาจกล่าวได้ว่าโลหะ Mn มีความเหมาะสมที่ประยุกต์ใช้เพื่อลดการหลุดออกของแอมโมเนียในระบบ เนื่องจากการมีประสิทธิภาพการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียที่ดี และการทำปฏิกิริยาแล้วเกิดตกตะกอนได้ต่ำทำให้ไม่จำเป็นต้องมีการเติมสารเพิ่มในระบบเพื่อควบคุมประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้คงที่ตามที่ต้องการ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในทางเศรษฐศาสตร์การลงทุน

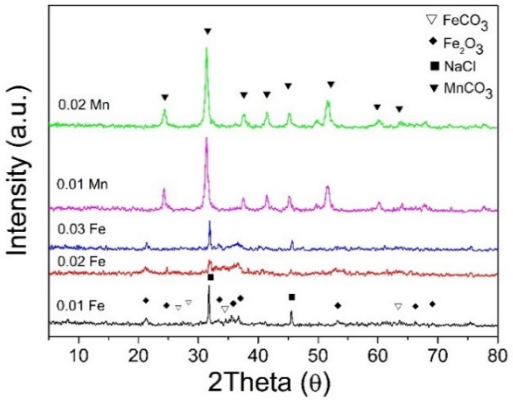


Figure 4 Effect of additive type (Fe^{2+} and Mn^{2+} metal) and concentration on solid products by XRD method

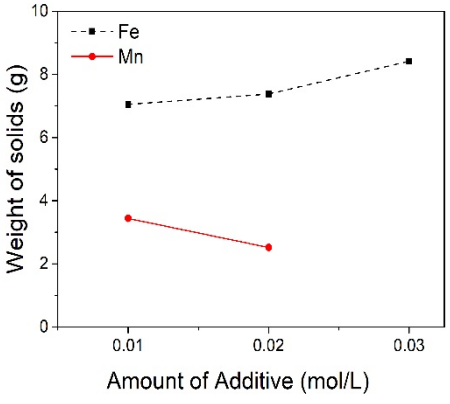


Figure 5 Effect of additive type (Fe^{2+} and Mn^{2+} metal) and concentration on precipitated solid

ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวที่เหลือในระบบที่เติมโลหะ Fe^{2+}

หลังจากสิ้นสุดการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว ตะกอนของแข็งจะถูกแยกออกมาจากสารละลาย จากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปอบแห้งและส่งวิเคราะห์หาองค์ประกอบของของแข็งที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง X-Ray Florescence (XRF) พบว่า ตะกอนมีองค์ประกอบธาตุต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน (C), เหล็ก (Fe)และโซเดียม(Na) โดยการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะ Fe^{2+} ทำให้แนวโน้มน้ำหนักของตะกอนเพิ่มมากขึ้น 1.57, 1.79 และ 2.93 กรัม ตามลำดับความเข้มข้นโลหะ Fe^{2+} 0.01, 0.02 และ 0.03 mol/l เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของธาตุในตะกอน พบว่า ธาตุคาร์บอน (C) และเหล็ก (Fe) จะเพิ่มมากขึ้นตามแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเหล็กสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้ดี และเกิดเป็นตะกอนสูง ในขณะที่ธาตุโซเดียม (Na) มีไปตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงน้อยที่ 0.01และ 0.03 mol/l (Figure 6a)) และในส่วนของของเหลวหลังการทำปฏิกิริยาเมื่อนำไปทดสอบด้วยเทคนิคส่งวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค Atomic Absorption (AA) พบว่าความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ได้แก่ โซเดียม(Na^+), คลอไรด์ (Cl^-)และเหล็ก(Fe^{2+}) มีแนวโน้มของธาตุมากขึ้นแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย $FeCl_2$ (0.01,0.02 และ 0.03 mol/l) ตามลำดับ โดยที่ไอออนโซเดียม(Na^+) มีค่าคงเหลือ 6.2181 6.0207 และ 6.6878 g ตามลำดับ ไอออนคลอไรด์ (Cl^-) 16.596 17.6113 และ 19.2367 ตามลำดับ และมีไอออนเหล็ก (Fe^{2+}) คงเหลือ 0.1183 0.644 และ 0.651 mg ตามลำดับ (Figure 6b)) จะเห็นว่าเมื่อเทียบ Fe^{2+} กับ Na^+ และ Cl^- พบว่า Fe^{2+} มีปริมาณที่น้อยมาก (< 1 mg) เนื่องมาจากเหล็กจะไปอยู่ในรูปของตะกอนโดยส่วนใหญ่หลังจากทำปฏิกิริยาดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

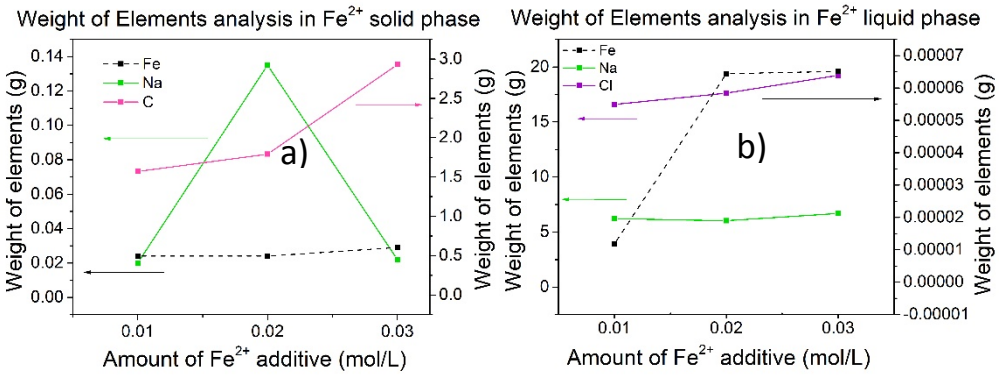


Figure 6 Effect of addition Fe^{2+} metal on solid product and liquid effluent; a) solid phase b) liquid phase

ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวที่เหลือในระบบที่เติมโลหะ Mn^{2+}

ผลจากการเติมโลหะสารละลาย $MnCl_2$ น้ำหนักของตะกอนและองค์ประกอบธาตุต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน (C), แมงกานีส (Mn) และโซเดียม (Na) พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะ Mn^{2+} แนวโน้มน้ำหนักของตะกอนมีค่าลดลง ตามความเข้มข้น Mn^{2+} ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ (0.01, 0.02 และ 0.03 mol/L โดยตะกอนของธาตุ C ที่เกิดขึ้นมีค่า 3.32 และ 2.06 g ตามลำดับ โดยที่ ความเข้มข้น 0.03 mol/l ไม่สามารถตรวจสอบองค์ประกอบของตะกอนได้ด้วยเทคนิค XRF เนื่องจากปริมาณตะกอนที่เกิดมีปริมาณน้อยมาก ในขณะที่ธาตุ Na มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นโลหะ Mn^{2+} โดยมีค่า 0.12 และ 0.45 g ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า Mn ทำหน้าที่เป็นอะตอมกลางในการยึดเกาะกับลิแกนด์ของแอมโมเนียได้ดี ไม่ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาของโลหะโซเดียมต่อการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ($NaHCO_3/Na_2CO_3$) ทำให้มีปริมาณธาตุของ Na อยู่ในตะกอนของผลิตภัณฑ์ของแข็งเพิ่ม

มากขึ้น (Figure 7a)) นอกจากนี้ในส่วนของของเหลวหลังการทดสอบปฏิกิริยาจะถูกนำไปตรวจสอบองค์ประกอบที่เหลืออยู่ของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค Atomic Absorption (AA) พบว่า เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะ Mn^{2+} 0.01, 0.02 และ 0.03 mol/L ตามลำดับ ไอออนของโซเดียม (Na^{+}) ,คลอไรด์ (Cl^{-}) และแมงกานีส (Mn^{2+}) มีแนวโน้มดังนี้ Na^{+} ion มีค่า 5.923 , 6.769 และ 7.303 g ตามลำดับ Cl^{-} ion มีค่า 17.23 , 17.61 และ 18.36 g ตามลำดับ และ มี Mn^{2+} ion เกิดขึ้น 0.06 2.73 และ 4. 24 mg ตามลำดับ (Figure 7b)) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะโลหะเหล็กและแมงกานีสจะพบว่าปริมาณที่หลงเหลืออยู่ในสารละลายมีค่าต่างกันพอสมควรโดยแมงกานีสยังคงเหลือในระบบมีค่าสูงกว่าเหล็กประมาณ 6.5 เท่า โดยที่ความเข้มข้น 0.03 mol/l มีค่าไอออนของ Mn^{2+} เท่ากับ 4.24 ในขณะที่เหล็กเหลือเพียง 0.65 mg/l ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าไอออน Mn^{2+} เกิดเป็นคอมเพลกซ์กับแอมโมเนียได้ดีสังเกตจากผลการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียและการเกิดตะกอนที่ลดลง กว่าการใช้โลหะเหล็กเป็นตัวยับยั้ง

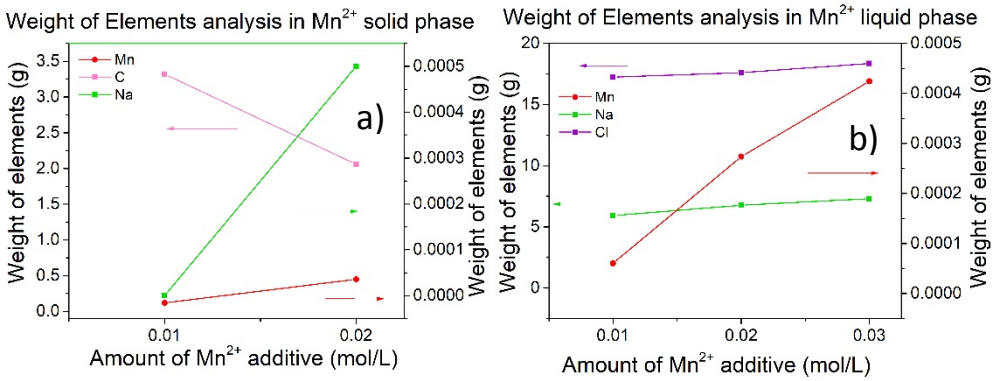


Figure 7 Effect of addition Mn^{2+} metal on on solid product and liquid effluent; a) solid phase b) liquid phase

สรุป

การศึกษาผลของการเติมโลหะทรานซิชัน Mn^{2+} และ Fe^{2+} เทียบกับการไม่เติมโลหะ ส่งผลต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียรวมทั้งการเกิดผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวระหว่างการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้น้ำทะเลผสมแอมโมเนียความเข้มข้น 1%wt/v นั้น พบว่าการเติมโลหะ Fe^{2+} ให้ประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดคือ 70% รองลงมาคือ Mn^{2+} มีค่า 60% และโลหะทั้งสองมีแนวโน้มการดักจับที่สูงขึ้นตามความเข้มข้นของปริมาณโลหะ (0.01 0.02 และ 0.03 mol/l) ในขณะที่ระบบที่ไม่เติมโลหะมีประสิทธิภาพต่ำกว่ามากภายในเวลาที่ทำการทดสอบที่เท่ากัน ในขณะที่ Mn^{2+} กลับเป็นตัวช่วยเหนี่ยวรั้งแอมโมเนียในระบบได้ดี ช่วยลดปริมาณการสูญเสียก๊าซแอมโมเนียได้ดีกว่า Fe^{2+} โดยจะเกิดพันธะเชิงซ้อนกับแอมโมเนียเป็นสารประกอบในรูป $Mn(NH_3)_6^{2+}$ ซึ่งแม้ว่าจะเติมเพียง 0.01-0.02 mol/l ยังให้ค่าการยับยั้ง 50% ถึงตรงกันข้ามกับโลหะ Fe^{2+} ที่มีแนวโน้มว่าจะต้องเติมมากกว่า 0.03 mol/l จึงจะมีประสิทธิภาพการยับยั้งแอมโมเนียที่ใกล้เคียงกับ Mn^{2+} และจากผลวิเคราะห์จากผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่อง Atomic Absorption (AA) พบว่า ไอออน Mn^{2+} มีค่าคงเหลือในระบบมากว่า Fe^{2+} ถึง 6.5 เท่า อาจกล่าวได้ว่า Mn^{2+} มีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวช่วยยับยั้งแอมโมเนียในระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านปิโตรเลียมและปิโตรเคมีรวมถึงภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Kim, Y., S.-R. Lim and J.M. Park. 2012. The Effects of Cu(Ii) Ion as an Additive on NH_3 Loss and CO_2 Absorption in Ammonia-Based CO_2 Capture Processes. **Chemical Engineering Journal** 211-212 (Supplement C): 327-335.

Li, K., H. Yu, M. Tade and P. Feron. 2014. Theoretical and Experimental Study of NH_3 Suppression by Addition of Me(Ii) Ions (Ni, Cu and Zn) in an Ammonia-Based CO_2 Capture Process. **International Journal of Greenhouse Gas Control** 24 (Supplement C):54-63.

Peng, Y., B. Zhao and L. Li. 2012. Advance in Post-Combustion CO_2 Capture with Alkaline Solution: A Brief Review. **Energy Procedia** 14 (Supplement C):1515-1522.

Shuangchen, M., S. Huihui, Z. Bin, C. Gongda and S. Zhu. 2013. Experimental Study of Co(Ii) Additive on Ammonia Escape in Carbon Capture Using Renewable Ammonia. **Chemical Engineering Journal** 234 (Supplement C):430-436.

Shuangchen, M., C. Gongda, H. Tingting, Z. Sijie and Y. Jing. 2015. Experimental Study on the Effect of Ni(Ii) Additive on Ammonia Escape in CO_2 Capture Using Ammonia Solution. **International Journal of Greenhouse Gas Control** 37 (Supplement C): 249-255.

การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงชุดโครงสร้างกระบะของเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อน ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A Design and Analysis of Strength of Bin of Grapple Log Loader Tool by Finite Element Method

ศุภัชฎา หาญชนะ[1*] ศุภกิตติ์ สายสุนทร[2] และ นพรัตน์ คัคคุริวาระ[1]

Supatchada Harnchana[1*], Supakit Sayasoonthorn[2] and Nopparat Kaakkurivaara[1]

บทคัดย่อ

การออกแบบเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนรูปแบบใหม่นั้นมาจากแนวคิดที่จะทำการรวมหลักการทำงานของรถแทรกเตอร์การเกษตร และรถงา ให้สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องในเครื่องเดียวกัน ซึ่งการเคลื่อนย้ายไม้ท่อนในแต่ละครั้งนั้นเป็นงานที่มีน้ำหนักไม้เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นต้องทำการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของตัวโครงสร้างชุดกระบะเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนเป็นขั้นตอนแรก โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยใน 1) การออกแบบ ขนาดของโครงสร้างชุดกระบะมีความยาวเท่ากับ 6.10 เมตร ความกว้างเท่ากับ 2.00 เมตร 2) การวิเคราะห์ความแข็งแรงของตัวโครงสร้างชุดกระบะเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนต้นแบบจำลองนี้ ประกอบด้วยชิ้นงาน 2 ชิ้น คือ โครงสร้างฐานหลัก และชุดกระบะรองรับไม้ท่อน ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) โดยกำหนดโหลดที่กระทำต่อโครงสร้างฐานหลัก ที่น้ำหนักของไม้ท่อนประมาณ 4,500 กิโลกรัม (รวมน้ำหนักกระบะรองรับ) พบว่า ค่าความปลอดภัยของโครงสร้างฐานหลัก มีค่าเท่ากับ 3.14 แสดงว่าเครื่องมือนี้สามารถรองรับน้ำหนักไม้ท่อนได้อย่างปลอดภัย ซึ่งผู้ปฏิบัติงานจะปลอดภัยในขณะทำงานโดยที่ตัวโครงสร้างชุดกระบะจะไม่เกิดการเปลี่ยนรูป จากผลการศึกษางานวิจัยนี้สามารถนำข้อมูลไปปรับใช้ในการสร้างเป็นเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนต้นแบบจริง

ABSTRACT

The design of the new concept of the timber extraction tool combined farm tractor and forklift loader. For work on the one machine continuously. So, design and strength analysis of a bin of grapple log loader tool is the first step. Using a computer program to help 1) Design – the length of a bin of grapple log loader tool is 6.10 m., width is 1.52 m. 2) Analysis of Strength a bin of grapple log loader tool – By Finite Element Method (FEM). It consists of two parts: a base structure and a loading space. The force acting on a base structure divided into the weight of timber about 4,500 kg. (Including a loading space weight). We found that the factor of safety of a base structure is 3.14. This means that the tool can safely handle the weight of the logs while the operator is safe while working. The results of this study are expected to the construction of a prototype of this machine.

Key Words: loading tool, logging truck, strength analysis

*Corresponding author; e-mail address: Supatchada.h@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การจัดเรียงรวมกองไม้ เป็นขั้นตอนหนึ่งที่อยู่ในกระบวนทำไม้ สวนป่าปลูกไม้เศรษฐกิจ เกิดขึ้นหลังจากการหมายเลขกองไม้ โดยการใช้เครื่องจักรกล 2 ชนิดด้วยกัน คือ 1) รถแทรกเตอร์ทางการเกษตร มีหน้าที่การลากไม้เรียงไว้ตามเลขกองที่หมายไว้ จากนั้น 2) รถงา หรือที่ผู้ปฏิบัติงาน เรียกว่า รถก๊บไม้ มีหน้าที่ยกไม้รวมเป็นกอง

จากขั้นตอนการทำงานดังกล่าวที่ต้องมีเครื่องมือช่วยจัดเรียงรวมกองไม้หลายชนิด ทำให้เกิดแนวคิดในการจำลองเครื่องมือต้นแบบที่ใช้ในงานจัดเรียงรวมกองไม้ โดยนำการทำงานที่สอดคล้องรวมไว้ในเครื่องเดียวกัน เพื่อลดจำนวนเครื่องจักร ลดขั้นตอนการจัดเรียงรวมกองไม้ และลดระยะเวลาในกระบวนการทำงานส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานมากขึ้น และเป็นการลดผลกระทบต่อหน้าดินที่เกิดจากการลากไม้ของรถแทรกเตอร์จนทำให้ดินอัดแน่นและเปิดหน้าดิน

จากเหตุผลดังกล่าวผู้ดำเนินงานวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในงานจัดเรียงรวมกองให้สามารถเคลื่อนย้ายไม้ท่อนพร้อมกับขึ้นกองไม้ได้อย่างต่อเนื่องในเครื่องเดียวกัน พร้อมทั้งใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ความแข็งแรงเฉพาะตัวชุดโครงสร้างกระบะของเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนที่ได้ทำการออกแบบ ที่สามารถบรรทุกไม้ท่อนได้ครั้งละ 4,000 กิโลกรัม

อุปกรณ์และวิธีการ

ศึกษารายละเอียดของเครื่องเคลื่อนย้ายไม้ท่อนแบบเดิม

เครื่องมือรูปแบบเดิม ทำหน้าที่จัดเรียงรวมกองไม้แต่ละกองตามหมายเลขกองที่คนงานหมายไว้ โดยมีรูปแบบขั้นตอนการจัดเรียงรวมกองไม้สักท่อนตามแผนภาพ (Figure 1) ซึ่งไม้ท่อนที่ทำการเคลื่อนย้ายในแต่ละรอบการทำงานนั้น มีความยาว 4 ระดับ คือ 3.20 4.20 5.20 และ6.20เมตร มีจำนวนท่อนไม้ที่เคลื่อนย้ายต่อครั้งเฉลี่ยประมาณ 40 ท่อน และมีน้ำหนักรวมประมาณ 4,000 กิโลกรัม จากนั้นนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการออกแบบชุดกระบะโครงสร้างของเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนต้นแบบจำลองต่อไป

(A) (B)

Figure 1 The existing timber extraction tools are a farm tractor (A) and a forklift loader (B).

การออกแบบต้นแบบจำลอง

การออกแบบโครงสร้างชุดกระบะของเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนที่เหมาะสมกับรูปแบบการทำงานในขั้นตอนรวมกองไม้ (Figure 2) ในกระบวนการสร้างต้นแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลอง (Giesecke *et al*, 2003) อธิบายตามแผนผัง Figure 3 ซึ่งในที่นี้จะอธิบายถึงส่วนประกอบ 2 ชนิด คือ โครงสร้างฐานหลัก และกระบะรองรับน้ำหนักการบรรทุกไม้ (Figure 4)

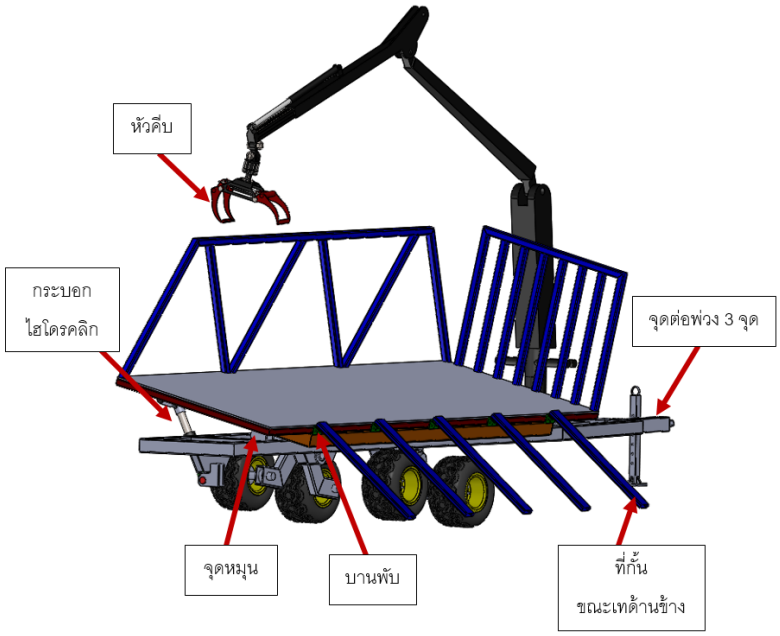


Figure 2 The design of the simulator grapple log loader tool.

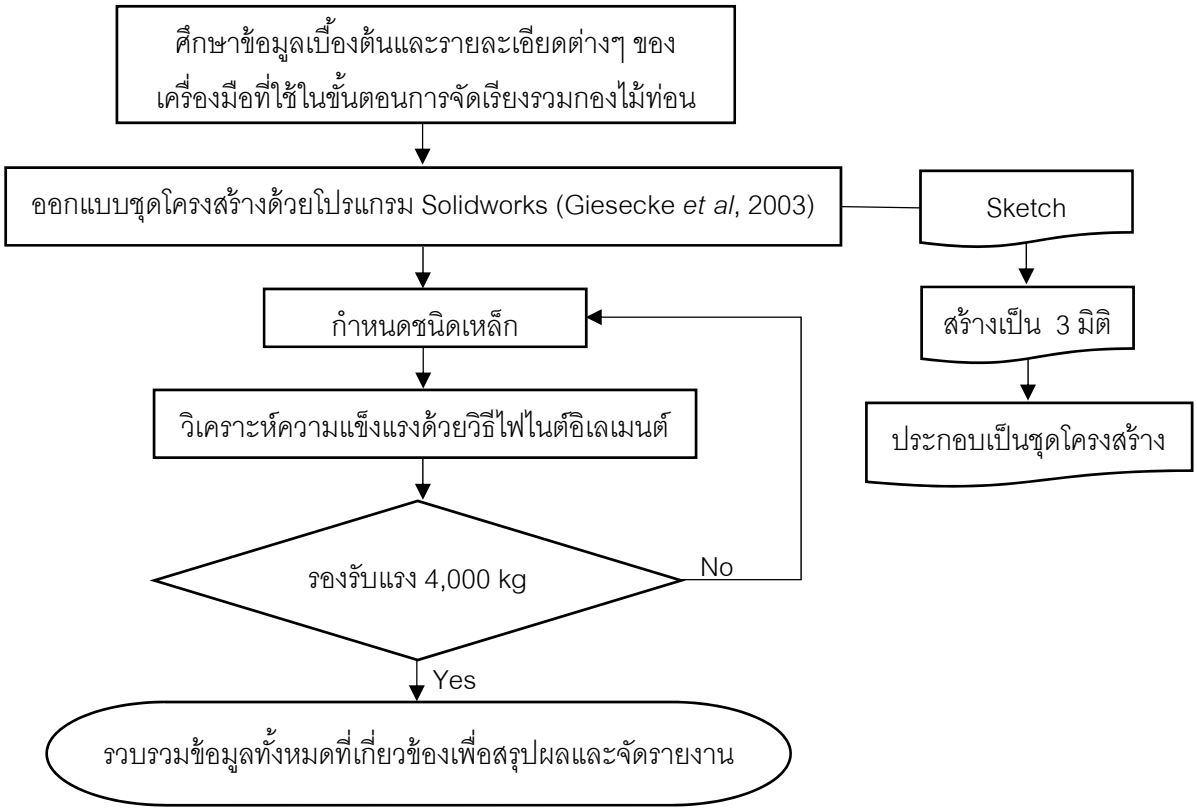


Figure 3 The flowchart of grapple log loader tool for design.

หลักการทำงานของเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนที่ออกแบบมานี้ มีขั้นตอนดังนี้ 1) ทำการคีบไม้มาวางบนกระบะบรรทุก 2) นำรถแทรกเตอร์ต่อพ่วง 3 จุดเคลื่อนย้ายไม้ท่อนไปยังกองไม้ตามหมายเลขกอง และ3) ทำการเทไม้ลงด้านข้าง จากนั้นอาจใช้หัวคีบในการจัดเรียงไม้เป็นกองไม้ ซึ่งเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนที่ออกแบบมานั้นจะช่วยลดกระบวนการทำงานของการใช้รถงา เพื่อลดจำนวนเครื่องจักรกลในการจัดเรียงรวมกองไม้ พร้อมทั้งมีตัวกระบะบรรทุกที่มีขนาดความยาวเท่ากับไม้ท่อนที่ยาวที่สุดที่เป็นสินค้าได้ เพื่อลดจำนวนรอบการทำงานในการเคลื่อนย้ายไม้ท่อนที่ขั้นตอนการจัดเรียงรวมไม้และลดการลากไม้ของรถแทรกเตอร์ที่ส่งผลต่อการอัดแน่นของหน้าดินจนทำให้ดินเป็นร่อง

การกำหนดรูปร่างของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบ

การกำหนดรูปร่าง และขนาดของเหล็กนั้นต้องสอดคล้องมาตรฐานอุตสาหกรรม TIS/JIS ซึ่งเหล็กที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด โดยตารางสรุปรูปร่างและคุณสมบัติในการรองรับน้ำหนักตามที่ต้องการ (Table 1) ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างชุดกระบะของเครื่องมือต้นแบบจำลอง (Figure 4)

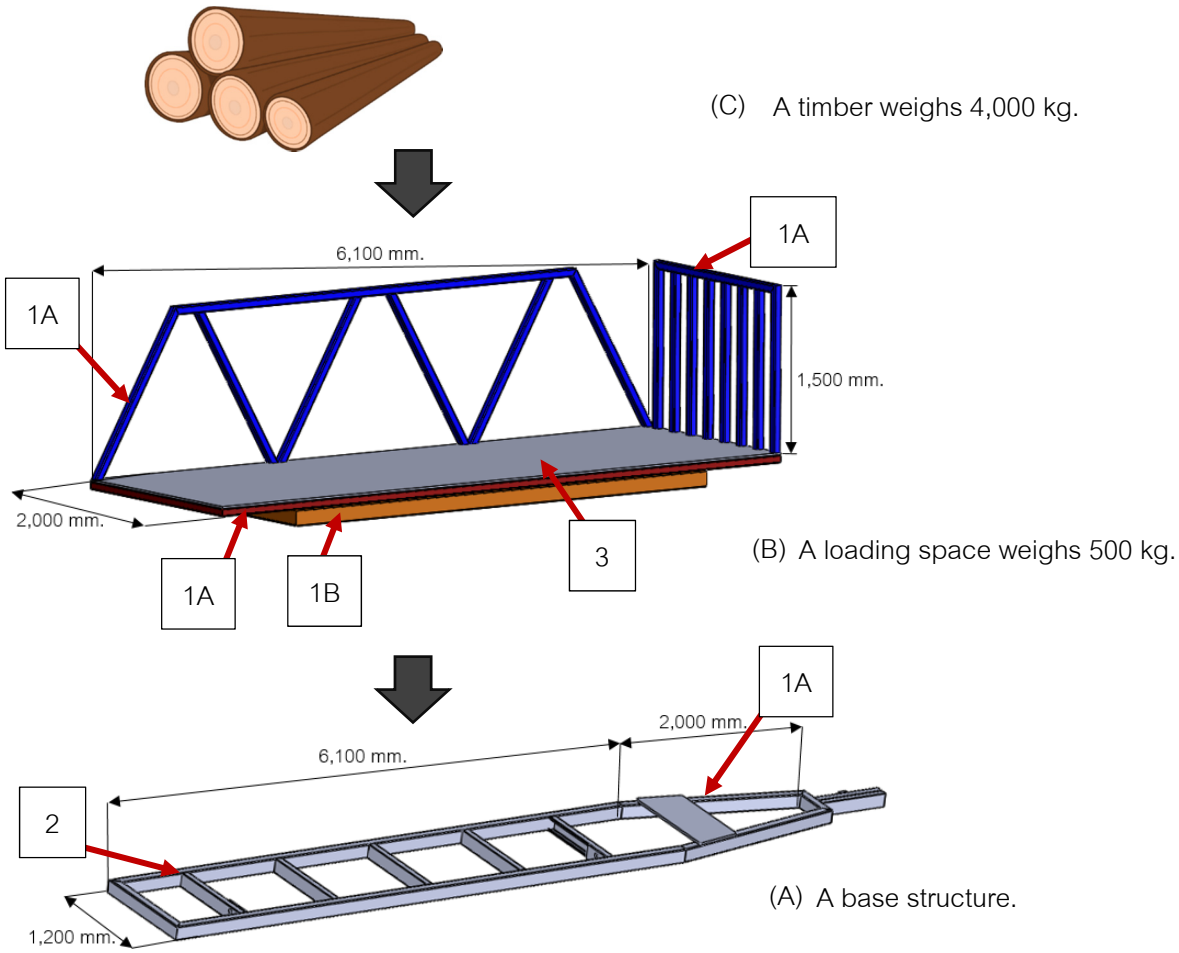
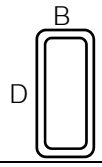
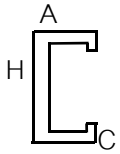
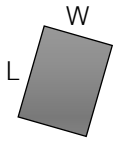


Figure 4 The design loading structure and a bill of materials of grapple log loader tool has a base - structure (A) and a loading space (B) and a timber for loading to grapple log loader tool (C).

Table 1 Shape and size of steel for design loading structure of grapple log loader tool.

Steel	Shape	Side Length (mm.)	Thickness (mm.)	Weight (kg./m.)	Section modulus Z_x, Z_y (cm^3)		Moment of inertia I_x, I_y (cm^4)	
1. Hollow Steel		A=75(D)x75(B)	4.50	12.27	26.29		98.58	
		B=150(D)x100(B)	4.50	16.62	87.46	70.25	655.93	351.27
2. C-Channel		150(H)x75(A)x25(C)	4.50	11.30	66.90	22.50	501	109
3. Sheet		1524(W)x6096(L)	25.00	-	-		-	

Source: ค้าเหล็กไทย (2553)

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของต้นแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างต้นแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นระเบียบวิธีการคำนวณใช้สำหรับการออกแบบในภาคอุตสาหกรรม (ปราโมทย์, 2552) โดยทำการกำหนดจุดยึดบริเวณด้านล่างของตัวโครงสร้าง ,มีโหลดที่กระทำต่อโครงสร้างที่ 4,500 กิโลกรัม (รวมน้ำหนักกระบะ) ,กำหนดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่นำมาคำนวณ และการกำหนดวัสดุที่ใช้จากการออกแบบ จำเป็นต้องเลือกขนาด ElementและTolerance size ให้เหมาะสมกับสิ่งที่เราออกแบบ เนื่องจากใช้วัสดุต่างกันในแต่ละส่วนของเครื่องมือ ดังปรากฏในตาราง (Table 2)

Table 2 Mesh details of design loading structure of grapple log loader tool.

Section	Mesh Information	Details
A base Structure	1.Mesher Used	Standard mesh
	2.Element size	4.59 mm.
	3.Tolerance	0.23 mm.
	4.Total of Nodes	16,698
	5.Total of Elements	9,073
A loading space	1.Mesher Used	Standard mesh
	2.Element size	60.85 mm.
	3.Tolerance	3.04 mm.
	4.Total of Nodes	43,548
	5.Total of Elements	22,273

ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชุดโครงสร้างเครื่องมือ

1. การวิเคราะห์โครงสร้างฐานหลักของเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อน

หลังจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประมวลผลเรียบร้อยจะแสดงผลค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นตามแถบชั้นสี (Fringe Plot) พบว่าค่าความเค้นสูงสุด (Von Mises) เกิดจากภาระที่มากระทำนั้นทำให้เกิดความเค้นอัดบริเวณจุดเชื่อมคานของโครงสร้างฐานหลักสำหรับยึดเหล็กแสดงด้วยค่าสีแดง เนื่องจากเป็นรอยเชื่อมต่อระหว่างเหล็กซึ่งสัมพันธ์กับโหลดที่กระทำ มีค่าเท่ากับ 8.993e+007 N/m^2 ซึ่งค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าน้อยกว่าค่าความต้านแรงคราก (Yield strength) ของวัสดุที่มีค่าเท่ากับ 2.827e+008 N/m^2 ดังนั้นจึงไม่ทำให้จุดเชื่อมคานดังที่ได้กล่าวมานั้นเกิดความเสียหายทางกล ค่าความปลอดภัยน้อยที่สุดที่เกิดขึ้น (Factor of Safety: FOS) มีค่าเท่ากับ 3.14 แสดงว่าสามารถทนต่อความล้าอันเนื่องแรงที่กระทำซ้ำไปซ้ำมาอย่างต่อเนื่อง หมายความว่าเป็นเครื่องมือที่มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติ และพบว่าค่าความเครียด ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการยืดตัวสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งส่วนกลางของคานเหล็กซึ่งแสดงด้วยสีแดง มีค่าการยืดสูงสุดเท่ากับ 23.55 มิลลิเมตร (Figure 5)

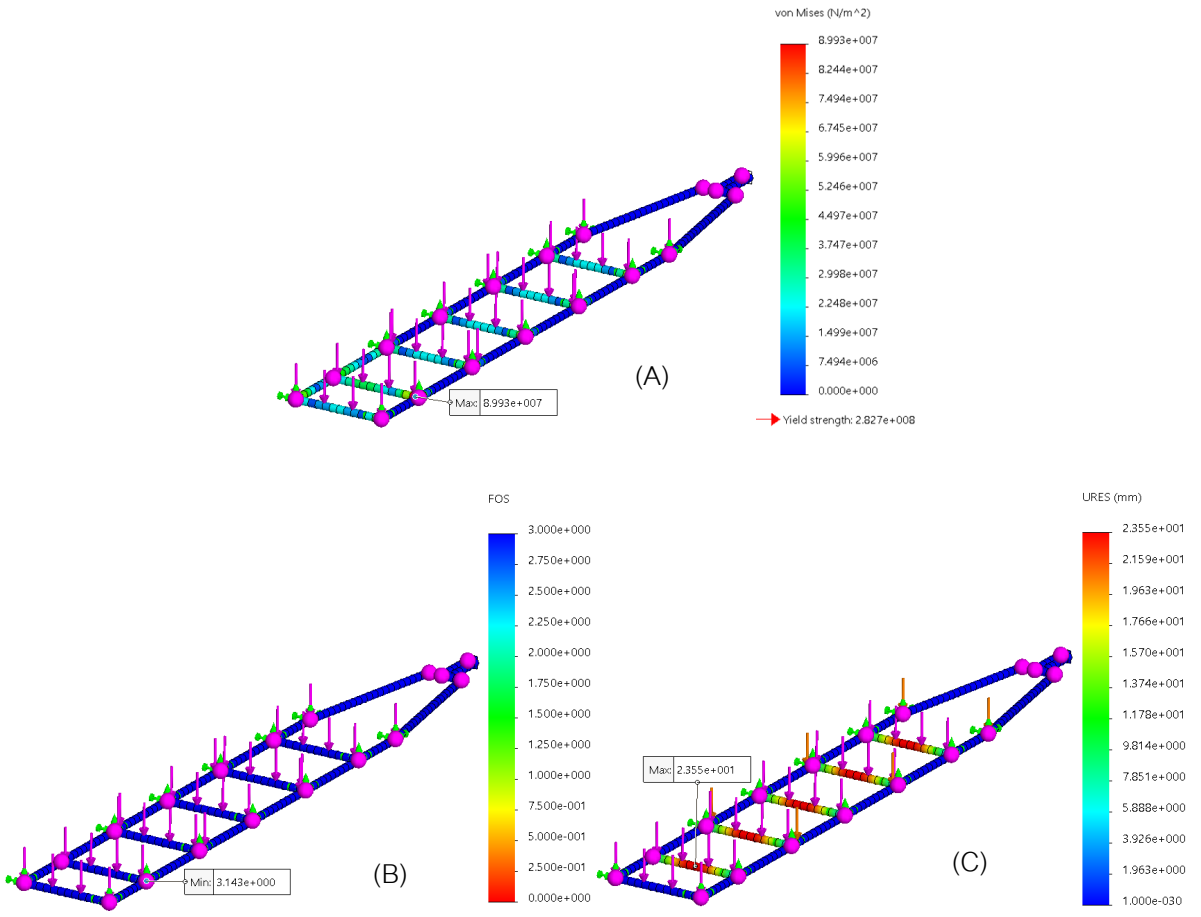


Figure 5 Analysis of Strength on the design of a base structure is base on von Mises stress values (A) and factor of safety (B) and displacement values(C).

2. การวิเคราะห์กระบะรองรับการบรรทุกไม้ของเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อน

ผลจากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของกระบะรองรับการบรรทุกไม้ ซึ่งได้ทำการศึกษาเฉพาะส่วนที่รองรับน้ำหนัก พบว่าค่าความเค้นสูงสุด (Von Mises) ที่เกิดจากภาระที่มากระทำนั้นทำให้เกิดความเค้นอัดบริเวณตรงกลางกระบะรองรับเข้ากับโครงสร้างฐานหลักมีค่าเท่ากับ 1.599e+007 N/m^2 ซึ่งค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าน้อยกว่าค่าความต้านแรงคราก (Yield strength) ของวัสดุที่มีค่าเท่ากับ 2.827e+008 N/m^2 ดังนั้นจึงไม่ทำให้กระบะดังที่กล่าวนั้นเกิดความเสียหายทางกล การยืดตัวสูงสุดของกระบะรองรับไม้ท่อนบริเวณส่วนกลางของกระบะแสดงด้วยสีแดง มีค่าเท่ากับ 2.46 มิลลิเมตร และค่าความปลอดภัยน้อยที่สุดที่เกิดขึ้น (Factor of Safety: FOS) บริเวณส่วนกลางของเหล็กแผ่นที่ใช้รองรับการบรรทุกไม้ท่อน มีค่าเท่ากับ 15.11 แสดงว่าสามารถทนต่อความล้าอันเนื่องแรงที่กระทำซ้ำไปซ้ำมาอย่างต่อเนื่องได้ ซึ่งทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในการใช้งานไม่เกิดการเปลี่ยนรูปขณะที่ปฏิบัติงาน (Figure 6)

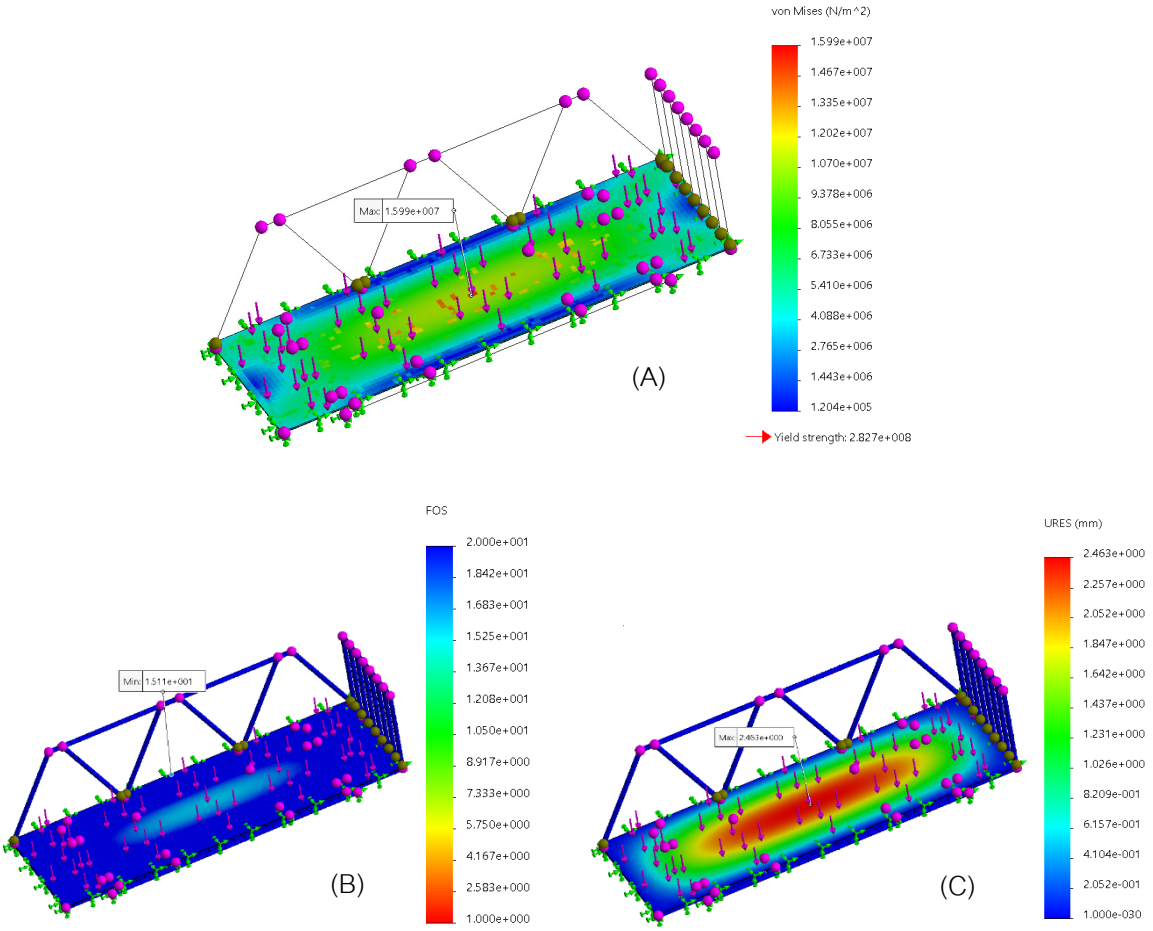


Figure 6 Analysis of Strength on the design of a loading space is base on von Mises stress values (A) and factor of safety (B) and displacement values(C).

สรุป

จากการออกแบบ และวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องมือช่วยเคลื่อนย้ายไม้ท่อน ที่ใช้ในงานวิศวกรรมป่าไม้ ได้กำหนดแรงที่มากระทำต่อโครงสร้างฐานหลักที่น้ำหนักประมาณ 4,500 กิโลกรัม ซึ่งเป็นแรงกระทำที่รวมน้ำหนักของกระบะรองรับการบรรทุกไม้ท่อนด้วย ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element

Method, FEM) พบว่าค่าความปลอดภัย มีค่าเท่ากับ 3.14 โดยบริเวณที่จะเกิดความเค้นสูงสุด คือเกิดขึ้นบริเวณจุดเชื่อมคานของโครงสร้างฐานหลักสำหรับยึดเหล็ก เนื่องจากมีการเชื่อมต่อในบริเวณดังกล่าว และความเครียดเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งส่วนกลางของคานเหล็กของโครงสร้างเครื่องมือเลื่อนย้ายไม้ท่อนนั้น ทำให้เกิดการยืดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 23.55 มิลลิเมตร ส่วนการวิเคราะห์การกระจายความเค้นของกระบะบรรทุกไม้ท่อน ได้กำหนดแรงที่มากระทำเป็นน้ำหนักของไม้ท่อนที่เคลื่อนย้ายในแต่ละครั้งประมาณ 4,000 กิโลกรัม พบว่าค่าความปลอดภัย มีค่าเท่ากับ 15.11 แสดงให้เห็นว่าตัวโครงสร้างชุดกระบะบรรทุกไม้ท่อน สามารถคีบและบรรทุกไม้ได้จริงตามการทดสอบการออกแบบเครื่องมือเคลื่อนย้ายไม้ท่อนจำลองนี้สามารถนำข้อมูลไปสร้างเป็นเครื่องมือต้นแบบจริงต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ จังหวัดลำปาง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ปราโมทย์ เดชะอำไพ, และคณะ. 2552. **การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วย**SolidWorks Simulation. สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ.

วิโรจน์ ลิ่มตระการ. 2556. เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็วต้นทุนต่ำสำหรับอุตสาหกรรม. **Asia-Paciffic PLASS&PACK**. 7(39): 22-24

Giesecke, F.E., A. Mitchell, H.C. Spencer, I.L. Hill, J.T. Dygdon and J.E. Novak. 2003. **Technical Drawing**. New Jersey, U.S.A.

บริษัท ค้าเหล็กไทย จำกัด. 2553. **ตารางเหล็ก**. แหล่งที่มา: https://goo.gl/VTTdTZ, 9 พฤศจิกายน 2560.

Informal Active Learning Space: Students Form Their Favorable Space

Thanyaporn Janma[1*]

ABSTRACT

In present, as Thai curriculum have improved, the school's space should be improved in order to support the curriculum. However, most schools in Thailand do not have those supportive spaces. One problem that's found is when visiting to any schools, students use learning space such as library for unexpected purpose. On the other hand, students who form their group along the corridor or the empty space with no such a facilities, they work out and conduct their work. This raised a question that the formal learning space that school provided may not be the answer for learning activities that students would need to achieve in their learning. The *informal* learning space will promote not only a few approved activities; but also, *environment* for people. Factors such as the availability of food and drink, comfortable chairs, furniture and nature that supports a variety of learning activities are emerging as critical in the design of learning space.

In this paper, Informal Active Learning Space is focusing on how student form their favorable space in school space and see what elements that support students' learning space. The study of emerging form of Informal Learning Space is to understand what makes such space effective for student's learning and to understand how students choose their learning space. This will result in criteria for architectural form and architectural elements for an informal active learning space. Two international schools in Thailand were selected to observe student behavior on how they choose their learning space. The results showed that the main factors which effect on how student choose their informal learning spaces are; 1) nature, 2) ventilation, and 3) level of privacy.

Key words: informal learning space, active learning space, desirable space, student's favorable space

*Corresponding author; e-mail address: Thanyaporn.janma@cuinda.com

[1]MArch, Faculty of Architecture, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330

INTRODUCTION

Perhaps the most significant function of the university or academic institution is to foster the learning of students. Throughout history, the classroom has been the traditional meeting place for students and educational facilitators, but in the present day, circumstances are rapidly changing, and the learning space needs no longer to be defined in terms of a physical location. The virtual world is also important. This has resulted in novel approaches to the teaching and learning environments which use the latest technologies to transform the traditional educational paradigm. This leads to a new definition of classroom space which focuses upon learning rather than simply the class itself (Oblinger, 2005) since the learning is no longer limited to fixed times and places. Anywhere, at any time, can now be considered a learning space (Brown & Long, 2006).

Many schools focus only upon the appearance of their buildings, believing that an attractive campus will lead to a positive atmosphere which will encourage learners. It is unusual for a school to focus upon creating learning spaces which can actually inspire children to learn by stimulating their minds, focus attention, and support the acquisition of key modern skills such as communication, co-operation, and critical thinking (Intel Education, 2014). According to Oblinger (2005), an active learning space can therefore be defined as a “regularly scheduled, physical location designed for face-to- face meetings of instructors and students”, which allows knowledge to be gained.

Furthermore, students should be able to obtain new skills, knowledge, and experiences all over a campus, and not just in the classrooms. Offices, libraries, gardens, corridors and countless other places can become learning spaces rather than simple places through which students must pass in order to reach their classes. These places could all be considered as flexible learning spaces for both individual learners and for groups of students, and can form a useful way to “better leverage valuable campus real estate” (Steelcase Education, 2014). This has resulted in the development of the concept of the Informal Active Learning Space. The term itself has often been used to talk about any form of learning which takes places beyond the confines of a traditional or formal learning program or learning facility (Eraut, 2000). This implies that the term can also describe the kind of learning which is derived from people’s ordinary work or leisure activities. Informal education has been described by Richardson (2004) as that which occurs beyond the “formal education system or structured training and does not lead to a qualification”. Conlon (2003) meanwhile contends that most informal learning can be considered the result of normal experiences in everyday life. The learning spaces which lead to such learning can be any kind of space used for leisure, and would therefore include parks, cafeterias, and any other such place where people spend their free time. A majority of schools in Thailand fail to use

their physical space effectively. For example, they create small gardens which look green and attractive, but do not allow people access. Dining halls are busy and limited purely to one function. Corridors and walkways cannot offer more functions than route; around the campus, while libraries are used for relaxation rather than learning. As space is often quite restricted, the students will tend to use the space available to them in their own ways. For instance, some groups of students will use play areas for learning instead of choosing to study at the tables provided or visit the library. This leads to a number of questions; 1) How are Informal Active Learning Spaces created by students in Thai schools? and 2) What factors are considered important by students when they select their Informal Active Learning Spaces? Therefore, the study of the emerging form of Informal Active Learning Space is to understand what makes such spaces effective for students' learning and to propose a design guideline for creating informal active learning spaces.

MATERIALS AND METHODS

1. Location of observation

Two schools were selected in order to study how students use space. The first school is International School Bangkok (ISB), Nonthaburi, which has a total area of 45 acres. This school has 1,900 students. The second school is Ruamrudee International School (RIS), Min Buri, Bangkok, with a total area of 29 acres. This school has 1,300 students. Most of the typical schools in Thailand are likely to have a higher number of high school students so the selected target group of the investigation is high school students as the space will be most significantly influenced by them. Moreover, the location of these two schools is in the suburban areas which indicate that they will have a similar context in terms of their overall location and building arrangements which will affect how they design the space for students. The reason for selecting international schools is the flexibility of their schedules and their curriculum which allows sufficient time to carry out the observations during various breaks. In addition, it allows a variety of cultures to be involved in this study, so the outcome of this study will not be based solely upon Thai students but upon more diverse cultures of students.

2. Methodology

To find the answer of how the built environment relates to the students to form their informal learning space, the research employed "mapping". This mapping will show the entire space of the school and show how students use each particular space in the school. To analyze those results from observations, the data were collected, notes down the activities according to space, time, and activity type, since the informal learning space has some relationship to the amount of time that can be spent

there since the use of such spaces may occur when students have a short time to do things but do not want to go across the campus to reach the officially provided space (Harrop & Turpin, 2013).

Methodology: 1) Select two international schools (in order to see the similarities or differences in the outcomes). 2) Map the entire area with the number of people, type of activities, and time spent. 3) From the observation, try to identify the nodes of the informal learning spaces. 4) Evaluate the data to see the relationships of all users and elements.

RESULTS AND DISCUSSION

1. International School Bangkok

In this case, the high school building, cafeteria, and surrounding green spaces are the most active spaces for students. The observation took place in accordance with the schedule of the school. It can be divided up into two breaks and one additional break for grades 11-12.

Firstly, the 10-minute break is when students have a short time to walk from class to class. The active space in this case is the corridor and pathway as students use those spaces in front of classrooms to discuss or review their work before entering the lesson. Figure 1 shows that students choose not to find a permanent space to sit for a long time but prefer to walk with a laptop or sit on the floor, sometimes finding some extended furniture to put their personal items on just for a short review of their work. In addition, there is a locker area provided at every corner of intersecting spaces. Most of these spaces will have small benches provided next to the locker but students did not use these for sitting; on the other hand, they use them for placing their text books to review instead. The cafeteria functioned as a grab-and- go facility. Mostly the students choose to use stools at the long and small tables because it is more convenient for them during short break periods.

Figure 1 Circulation space and counter bar at canteen.

The second observation came at the 50-minute lunch break. Observations during this break fell into three categories: “Study Only”, “Lunch and Study”, “No Lunch and No Study”. The needs of “Study Only” students can be seen from the Figure 2 that they are likely to choose an enclosed boundary space to study as partners form in a small group of no more than four people. This kind of space required a high

level of privacy so they would feel that staying in an enclosed room or hidden space will provide security from interruption during this break. Students who fall into this category do not need an official table or desk such as those normally found in classrooms. Instead, any kind of furniture will suffice if they can place their materials on it.

Figure 2 Desirable space.

Figure 3 Canteen space and locker area.

The “Lunch and Study” patterns in Figure 3 can also be divided into two main spaces from the observation: the outdoor space that is exposed to nature and the open space within the building. The concept that have been found among high school students is the rapid change in movement at open spaces such as the main cafeteria. They keep moving and changing their seat, which shows the variety of their choices and results in an atmosphere of semi-relaxation and semi-stressfulness.

For the outdoor space that exposed to nature, students sit more permanently throughout the 50-minute break but in the same way they are more relaxed and less stressed. As the outdoor space, seats were already arranged for groups, and had a roof or small umbrella as the boundary, this creates a certain level of privacy but in such a way as to allow students to from one area to observe the others. Another case that can be found is that students like to sit on the stairs or steps which are exposed to nature to discuss their work or to eat or talk in privacy. This type of “Lunch and Study” category does not require as much serious study as the “Study Only” group. The library section was surprising in terms of how students used the space for “Study Only” group.

Figure 4 Library area.

Figure 5 Student hub.

The library space in Figure 4 is designed for study usage but in this case the library is used as a play center. Students who need air conditioning will move to this space to cool down and relax until

the end of the 50-minute break. The arrangement of furniture and space to create a linear seating style along the walls does not work in forming a learning atmosphere. Also the small room is too congested with fancy furniture; therefore, nobody was interested in using that provided furniture and space. From this observation, if the venue is too big or too small, this will affect how students construct their learning space.

Lastly, there was an additional break for G11-12, or free period. During this time the students who have a free period mostly stay at the “Student Hub” which is a place comprising different types of space. There are single spaces for individual study, a study room for a group review, and even large built-in furniture with enclosed boundaries. There are also some students who want to grab some snacks or a drink so they choose to sit in the cafeteria. However, the way they choose their space depends on where the columns are located. It can be imply that during free periods, students are likely to choose an individual space that has a clearly defined boundary.

2. Ruamrudee International School

From observing RIS, there are two breaks and one free period for grades 11-12. In this case, two buildings of the high school were divided in the middle by a circulation road in the school. Because of this, a different effect may be created compared to ISB because the layout and arrangement of the buildings is not similar at all.

The 20-minute break is considered for a short break. In the Redeemer Hall, students who have their next class in the High School Building will hurry to go there and sit at the cafeteria while they are waiting for their next class. While they are walking, most of them are still reviewing their work and discussing the lesson. Those who have their next class at the Redeemer Hall are likely to sit along the corridors and pathways in Figure 6. They ignored the function of the seating space, turning the seating space into tables to do homework and store their bags, the same as in the High School Building. However, those corridors are a very busy space during the 20-minute break but the seating space next to it in the courtyard is ignored. On the other hand, stairs and steps are utilized by students who choose to sit on them. The cafeteria became a semi-grab- and-go space and permanent space for both students who have their next class in this building and those who do not.

Figure 6 Students use corridors and pathways at the Redeemer Hall.

During lunch RIS's cafeteria is a mess. The space is provided for having lunch only, not supporting others activities. Some students may look for their own favorable space during this time. From observation, it can be divided into three types of space. Firstly, students who need high level of privacy, they will find architectural elements that have potential to be transformed into their informal active learning space in Figure 7. These can be extended space of some floors or columns. Secondly, the students who need privacy but not too isolate from people, they will choose mostly small room or small area with transparent wall to sit in with their small group of friends. They still have connection with people from the outer space, but in this case they can have discussion among their group of friends. Lastly, students who need an open space, because they wouldn't want to join the crowd of students in cafeteria. With their own open space, it can be form at hall way, gigantic path way, or even on stair step swhich in this case stair's function is not only part of circulation but also seating for students.

Figure 7 Transforming of the architectural elements and spaces.

Figure 8 Patterns of how students use space during their free period.

Students who have free period, in this case is similar to ISB for students who choose to sit in cafeteria will choose their seat next to the column as they need boundary in Figure 8. However, because RIS has no student hub; consequently, the library is provided for the study space for them. If comparing the number of users between library and cafeteria, cafeteria still has greater number of students use. Furthermore, the space that next to the cafeteria is also been used in this case. For example, the hanging space over cafeteria that provides a perfect view and also plays with level of privacy, but is not too isolated.

3. Discussion

Nature is good in relaxing students, and offer good atmosphere. Students would spend time longer while they are studying in this area. These kinds of spaces help to relax their mind when they are stressed. Ventilation is also good in this hot and humid climate. Students choose to sit and create their learning space along corridors, intersections between buildings and semi open space where the good wind can flow through them. The cold temperature from ventilation is better for learning and student's concentration. For privacy, students choose their Informal Learning Space according to boundary that they found. It could be both vertical boundary and horizontal boundaries. Students may feel secure with what are they doing if they have defined boundary. Also, boundaries represent

occupied, enclosed elements for those who want to avoid something for their concentration. The limited of time is another factor that shape student's behavior in selecting spaces.

CONCLUSION

According to two places of observation, space should not be limited by provided functions. The outcome of the study gives the potential in design the informal active learning space. The open space with shading will bring people together. Too wide or too narrow of spaces will lead to the abandon of space. People in certain space should be able to see and interact with one another space. Limitation of time is the main influential factor that will effect student to give chance for them to change and to transform the space. The supporting elements of hanging or extended space in different spots and locations act as boundaries themselves. Moreover, a terrace, a balcony, and space in front of hall, basement (space under stairs), they all act as informal active learning space. Stair-cases that exposed to the outdoor can be adapted to many functions such as tables, desks, seating, dining areas, playgrounds, and they are even used as presentation stages for class activities. Some irregular shapes of structure or undesignated space could be turned into a favorable space of students.

ACKNOWLEDGEMENTS

Site building support in conducting this paper from the Head of International School Bangkok and the Head of Ruamrudee International School.

REFERENCES

Brown, Malcolm, and Philip Long. 2006. "Trends in Learning Space Design." **An EDUCAUSE e-Book** (Online). www.educause.edu/learningspaces, October, 2016.

Conlon, T. 2003. "A review of informal learning literature, theory and implications for practice in developing global professional competence." **Journal of European Industrial Training**, 28 (4): 283-295.

Eraut, Michael. 2000. "Non-formal Learning and Tacit Knowledge I Professional Work." **British Journal of Educational Psychology** (Online). www.old.mofet.macam.ac.il/iunarchive/mechkar/pdf/Non-formalLearning.pdf, April 26, 2016.

Intel Education. "Exploring Inner Space." **K-12 Blueprint(A planning resource for personalizing learning)** (Online). www.k12blueprint.com/content/exploring-inner-space, 2014.

Oblinger, Diana. 2005. "Leading the Transition from Classrooms to Learning Spaces." **Educause quarterly** 1(2): 14-18.

Richardson, S. 2004. "Employers' contribution to training." **NCVER** (Online). www.sapo.org.au/binary/binary761/employer.pdf, April 23, 2016.

Steelcase Education. 2014. "Active Learning Spaces." **Insight, Applications + Solutions** 4: 1-78.

การติดตามการเจริญเติบโตของนาข้าวด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ

Monitoring of Rice Growth with UAV-derived Aerial Imagery

พรหมชัย สุพรรณ[1] ธนัช เอกเกื้อกูล[1] เนติ ศรีหานู[1] และ **ศิวา แก้วปลั่ง**[2*]

Phromchai Supan[1], Tanut Aekkuerkul[1], Neti Srihanu[1] and **Siwa Kaewplang**[2*]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้ คือทำการติดตามการเจริญเติบโตของนาข้าวโดยใช้ความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง (R-B)/(R+B) และ R/(R+G+B) เพื่อประมาณปริมาณของคลอโรฟิลล์ในใบข้าวจากภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากกล้อง RGB ที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ พื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่ปลูกข้าวนาปีในจังหวัดขอนแก่น ทำการบินถ่ายภาพแปลงนาเก็บข้อมูล 4 ช่วงเวลา จากช่วงข้าวแตกกอจนถึงข้าวเมล็ดสุกแก่ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสงทั้ง 2 ชนิดสามารถใช้ในการติดตามการเจริญเติบโตของข้าวได้ และเป็นแนวทางสำหรับการทำการเกษตรแบบแม่นยำสูง

ABSTRACT

The objective of this study is to monitor rice growth by using the reflectance relation of (R-B)/(R+B) and R/(R+G+B) to estimate the content of leaf chlorophyll derived from aerial imagery captured by the RGB camera on the UAV (Unmanned Aerial Vehicle). The study was performed in the rice growing area in Khon Kaen. Field data had been collected in 4 time intervals between tillering stage to repening stage. The results show that both relation of reflectance can successfully be used to monitor of rice growth and provide for precision agriculture approaches.

Key Words: UAV, rice, remote sensing, precision agriculture

*Corresponding author; e-mail address: **siwakaewplang@yahoo.com**

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขอนแก่น 40000

[1]Faculty of Engineering, North Eastern University, Khon Kaen 40000

[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม 44150

[2]Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150

คำนำ

ข้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทย ความต้องการบริโภคข้าวมีสูงขึ้นในทุกปีแต่พื้นที่ในการผลิตข้าวกลับมีพื้นที่ที่จำกัด การบริหารจัดการนาข้าวจึงมีความสำคัญต่อผลผลิตข้าว การสำรวจการเจริญเติบโตแต่ละช่วงอายุของพืชเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการเกษตรความแม่นยำสูง (Thenkabail et al., 2000) การสำรวจข้อมูลจากระยะไกลมีศักยภาพในการให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกษตรความแม่นยำสูง (Mulla, 2013) ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากอากาศยานไร้คนขับในรูปแบบต่างๆรวมไปถึงการประยุกต์ใช้ในการเกษตรแบบแม่นยำสูง (Geipel et al., 2014) เนื่องจากเทคโนโลยีการรังวัดด้วยภาพด้วยภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้นักบินเป็นวิธีการสำรวจพื้นที่ที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินการ แรงงาน และอุปกรณ์น้อย หลายรายงานการศึกษาใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลศึกษาติดตามการเจริญเติบโตพื้นที่ปลูกข้าว (Nuarsa et al., 2007; Noureldin et al., 2013) มีรายงานการศึกษาใช้ช่วงคลื่น RGB ในการประมาณปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืชโดย Kawashima and Nakatani (1998) ใช้ความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง (R-B)/(R+B) ศึกษาสถานะคลอโรฟิลล์ทางใบในข้าวสาลีและ รายงานการศึกษาของ Cai et al. (2006) ใช้ความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง R/(R+G+B) ศึกษาปริมาณคลอโรฟิลล์ในกะหล่ำปลี จากหลายงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วพบว่ายังไม่มีมีการนำเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลโดยใช้อากาศยานไร้คนขับติดตั้งกล้องร่วมกับความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง (R-B)/(R+B) และ R/(R+G+B) มาทำการศึกษาเพื่อติดตามการเจริญเติบโตของข้าว ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นการนำเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลโดยใช้อากาศยานไร้คนขับติดตั้งกล้อง RGB เพื่อนำภาพมาคำนวณความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง (R-B)/(R+B) และ R/(R+G+B) สำหรับติดตามการเจริญเติบโตของข้าวโดยจะทำการติดตามจากช่วงข้าวแตกกอจนถึงก่อนข้าวเมล็ดสุก

อุปกรณ์และพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาเป็นแปลงนาอาศัยน้ำฝนในการปลูกข้าว ปลูกข้าวพันธุ์หอมมะลิ 105 บนที่นาเนื้อที่ประมาณ 2 ไร่ เริ่มทำการปักดำวันที่ 10 กรกฎาคม 2560 อยู่ที่ ต.บ้านทุ่ม อ.เมือง จ.ขอนแก่น อยู่ที่พิกัด 16°28’2.208” เหนือ และ 102°40’30.144” ตะวันออก ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ดอน มีฝนตกชุกทั่วไปปริมาณฝนเฉลี่ยตลอดปีของจังหวัดขอนแก่นเท่ากับ 1,230 มิลลิเมตร โดยมีอุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ย 36.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 15.4 องศาเซลเซียส

อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทำงานสนามเพื่อทำการเก็บข้อมูลประกอบด้วย [1] อากาศยานไร้นักบิน Phantom 3 Advanced พร้อมกล้องถ่ายภาพที่ติดตั้งมาจากโรงงาน และอุปกรณ์ควบคุมระยะไกล (Figure 1) [2] โทรศัพท์ Smart Phone ระบบปฏิบัติการ Android [3] Application PIX4D Capture (Figure 2)สำหรับใช้วางแผนการบิน

Figure 1 Phantom 3 Advanced and radio control

Figure 2 Application PIX4D Capture

ข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในการศึกษา

การวิจัยนี้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ Phantom 3 Advanced ที่บันทึกภาพเก็บข้อมูล ครั้งที่ 1 วันที่ 26 ส.ค. 2560 อยู่ในช่วงข้าวแตกกอ ครั้งที่ 2 วันที่ 1 ต.ค. 2560 อยู่ในช่วงข้าวตั้งท้อง ครั้งที่ 3 วันที่ 23 ต.ค. 2560 อยู่ในช่วงข้าวดอกบาน และครั้งที่ 4 วันที่ 15 พ.ย. 2560 อยู่ในช่วงข้าวเมล็ดสุกแก่พร้อมเก็บเกี่ยว รวม 4 ครั้ง โดยกล้องถ่ายรูป RGB ที่ติดตั้งมากับ Phantom 3 Advanced มีความละเอียด 12 ล้านพิกเซล FOV 94° 20 มิลลิเมตร (เทียบเท่ากับ 35 มิลลิเมตร) f/2.8 โดยมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงแต่ละช่วงคลื่นของกล้อง RGB ดังแสดงใน Figure 3 ทำการวางแผนการบินด้วย Application PIX4D (Draeyer and Strecha, 2014) โดยกำหนดความสูงของการบิน 30 เมตร ทำการถ่ายภาพให้มีระยะซ้อนด้านหน้า 80% และระยะซ้อนด้านข้าง 60% ทำการประมวลผลภาพถ่าย โดยใช้โปรแกรม Agisoft Photoscan Professional (Demo version) ทำการปรับแก้พารามิเตอร์กล้องถ่ายภาพ หลังจากผ่านกระบวนการประมวลผลภาพสร้างแผนที่ภาพออร์โท (Orthophoto map) ได้ค่าความละเอียดจุดภาพ (Ground resolution) เท่ากับ 0.015 เมตร/พิกเซล และใช้โปรแกรม QGIS Desktop 2.16.1 สำหรับการคำนวณและทำแผนที่ ความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง (R-B)/(R+B) และ R/(R+G+B)

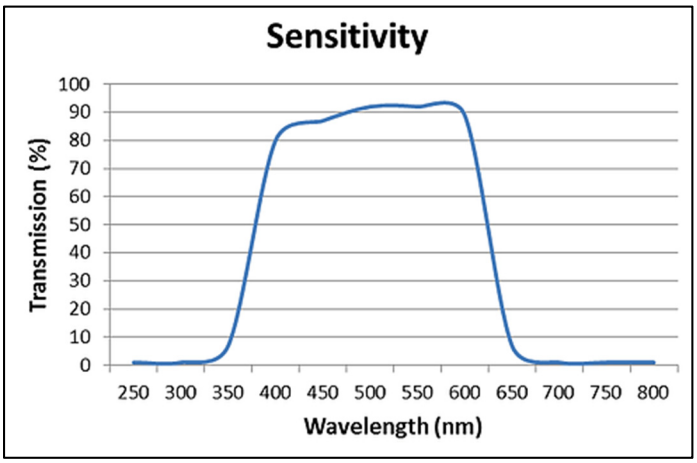


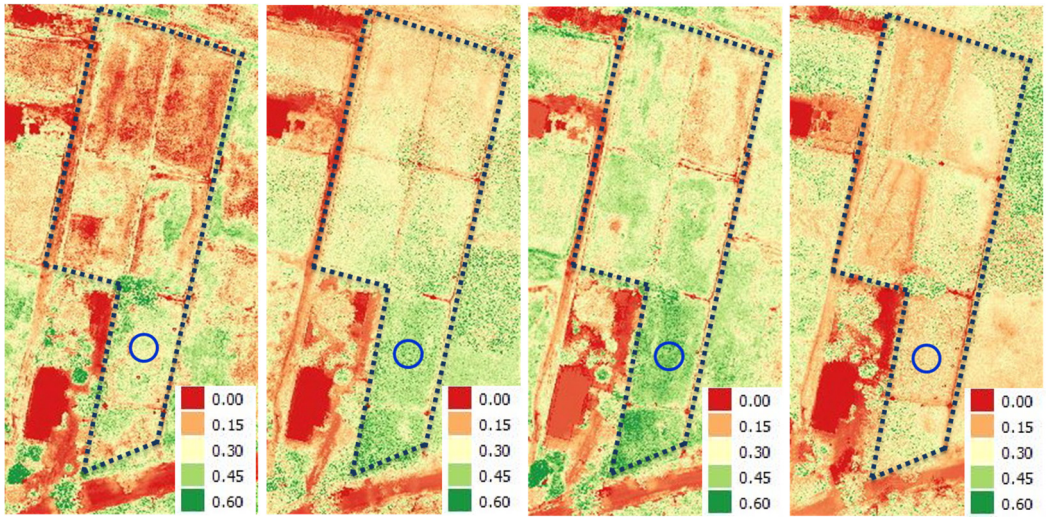
Figure 3 Transmission and wavelength of RGB Camera

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากกล้อง RGB ที่ติดตั้งบน UAV ได้ภาพแปลงนาทั้ง 4 ช่วงเวลา ดัง Figure 4 และแต่ละภาพจะถูกนำมาคำนวณค่าความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง (R-B)/(R+B) และ R/(R+G+B) โดย QGIS Desktop 2.16.1 ได้ผลการคำนวณแต่ละจุดภาพของความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง (R-B)/(R+B) ดังแสดงใน Figure 5 และ R/(R+G+B) ดังแสดงใน Figure 6 และ Plot กราฟความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสงทั้ง 2 ที่ตำแหน่งจุดภาพกลางวงกลม เพื่อแสดงให้เห็นแนวโน้มของค่าความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสงทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ในการศึกษาดัง Figure 7

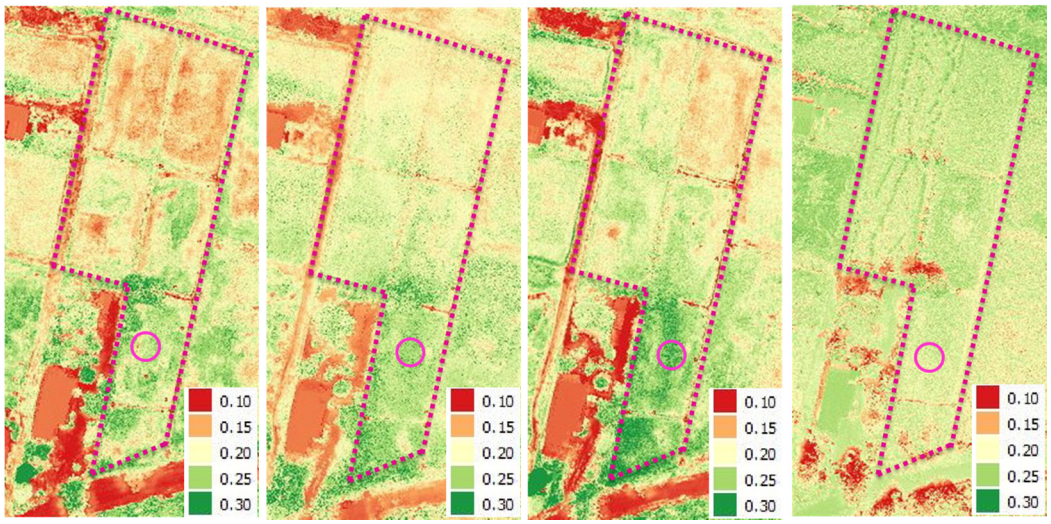
(a) Tillering stage (b) booting stage (c) flowering stage (d) ripening stage

Figure 4 Orthophoto map of paddy field from RGB Camera



(a) Tillering stage (b) booting stage (c) flowering stage (d) ripening stage

Figure 5 Relation of reflectance map from (R-B)/(R+B)



(a) Tillering stage (b) booting stage (c) flowering stage (d) ripening stage

Figure 6 Relation of reflectance map from R/(R+G+B)

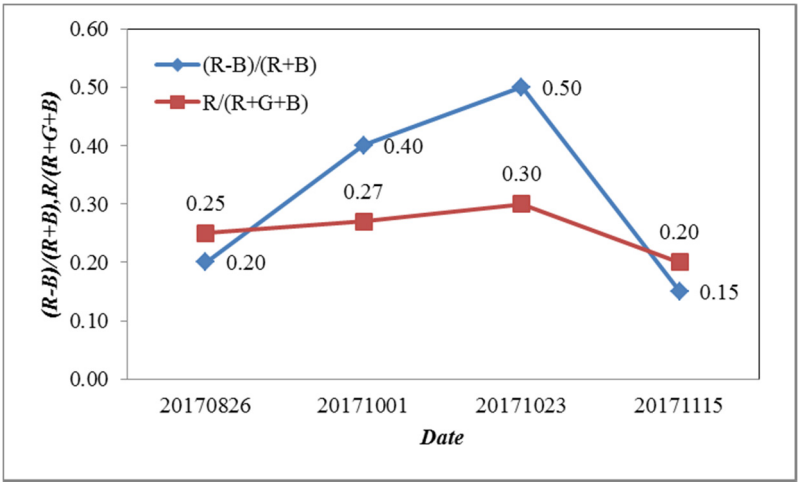


Figure 7 Relation of reflectance (R-B)/(R+B), R/(R+G+B) and Date

โดยในช่วงของการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 วันที่ 26 ส.ค. 2560 อยู่ในช่วงข้าวแตกกอ ครั้งที่ 2 วันที่ 1 ต.ค. 2560 อยู่ในช่วงข้าวตั้งท้อง ครั้งที่ 3 และวันที่ 23 ต.ค. 2560 อยู่ในช่วงข้าวดอกบาน เป็นช่วงที่มีค่าคลอโรฟิลล์ในใบข้าวมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตของต้นข้าวซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบว่าค่าความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง (R-B)/(R+B) และ R/(R+G+B) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามการเจริญเติบโตของต้นข้าวด้วยเช่นกัน และการเก็บข้อมูลครั้งที่ 4 วันที่ 15 พ.ย. 2560 อยู่ในช่วงข้าวเมล็ดสุกแก่พร้อมเก็บเกี่ยว เป็นช่วงที่มีค่าคลอโรฟิลล์ในใบข้าวลดลง โดยค่าความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง (R-B)/(R+B) และ R/(R+G+B) มีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน (ดู Figure 7) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Nuarsa et al. (2007) และ Noureldin et al. (2013) โดยจากผลการศึกษาจะพบว่าความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง (R-B)/(R+B) จากผลการคำนวณจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.00 - 0.60 จะมีช่วงในการตรวจวัดกว้างกว่าความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง R/(R+G+B) ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.10 - 0.30 แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาจะพบว่าความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสงทั้งสองที่เลือกนำมาทดสอบสามารถใช้ในการติดตามการเจริญเติบโตของต้นข้าวและสามารถใช้เป็นแนวทางในการทำการเกษตรแบบแม่นยำสูงได้

สรุป

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสงทั้ง 2 ชนิดสามารถใช้ในการติดตามการเจริญเติบโตของข้าวได้ และเป็นแนวทางสำหรับการทำการเกษตรแบบแม่นยำสูง แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ใช้เพียงภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับถ่ายภาพในแปลงทดสอบเท่านั้น ควรมีการทำวิจัยเพิ่มเติมในพื้นที่อื่นๆ และมีการตรวจวัดข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าว เช่น ความสูง ชีวมวล และดัชนีพื้นที่ใบของต้นข้าว เพื่อทดลองสร้างแบบจำลองการประมาณพารามิเตอร์ในการติดตามการเจริญเติบโต ปัญหาโรคและศัตรูพืชต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Cai, H., Haixin, C., Weitang, S., and G, Lihong, G. 2006. Preliminary study on photosynthetic pigment content and color feature of cucumber initial blooms, **Trans. CSAE** 22: 34–38.

Geipel, J., Link, J. & Claupein, W. 2014. Combined Spectral and Spatial Modeling of Corn Yield Based on Aerial Images and Crop Surface Models Acquired with an Unmanned Aircraft System. **Remote Sensing** 6(11): 10335-10355.

Kawashima, S., and Nakatani, M. 1998. An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera, Ann. Bot. 81: 49-54.

Mulla, D.J. 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering** 114(4): 358-371.

Noureldin, N. A., Aboelghar, M. A., Saudy, H. S. and Ali, A.M. 2013. Rice yield forecasting models using satellite imagery in Egypt. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences** 16: 125-131.

Nuarsa, I.W. and Nishio, F. 2007. Relationships between rice growth parameters and remote sensing data. **Journal of Remote Sensing and Earth Sciences** 4: 102-112.

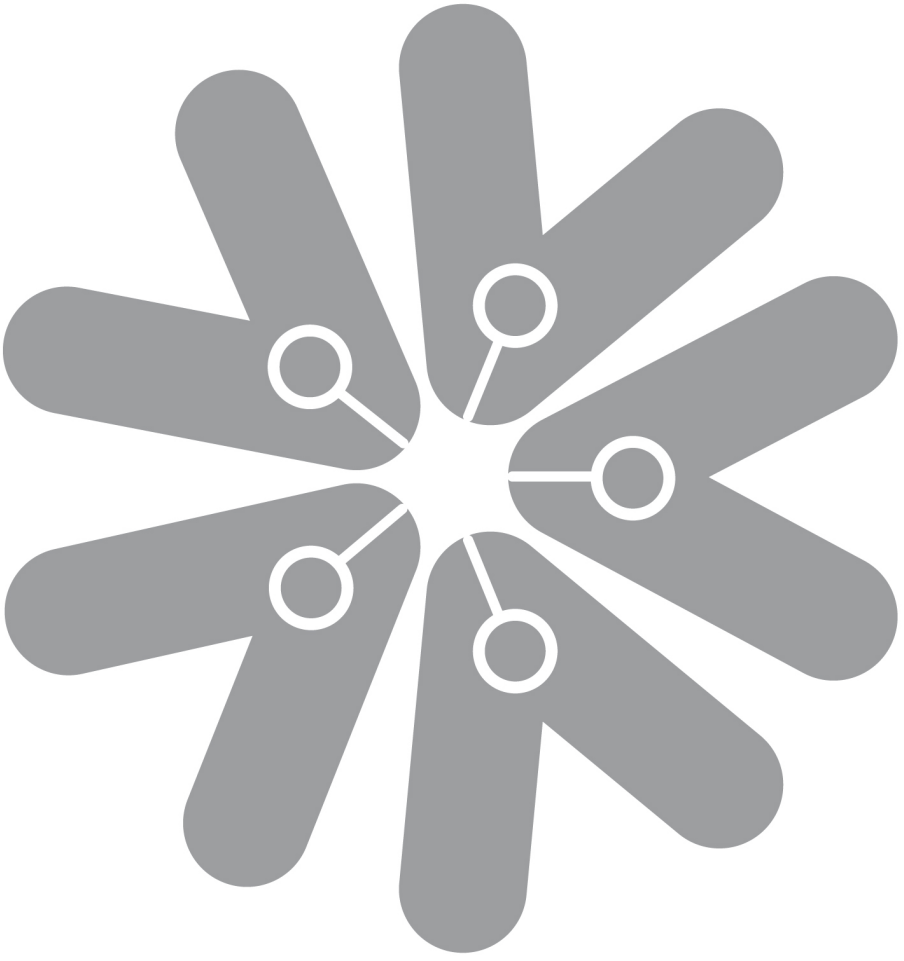
Thenkabail, P. S., Smith, R. B., & De Pauw, E. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. **Remote sensing of Environment** 71(2): 158-182.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

Subject: Agro-Industry

ภาคบรรยาย

Oral Presentation



Hydrolysis of Napier Grass in Leach Bed Reactor for Methane Production: Effects of Biological Pretreatment and Leachate Temperature

Sutinee Lowattanatakul[1], Wanna Choorit[1, 2*] and Yusuf Chisti[3]

ABSTRACT

Napier grass is a promising feedstock for methane production. Napier grass biomass contains mostly cellulose, hemicellulose and lignin, but is difficult to degrade without prior treatment in an anaerobic digester. Here we report on the use of a leach bed reactor (LBR), as a first stage reactor of a two-step process for biogas production. The LBR stage is intended for hydrolysis of the biomass and production of volatile fatty acids from the hydrolysate. LBRs are potentially applicate to any solid substrate. Efficiency of the LBRs treating Napier grass under four different operating conditions over a period of 10 days was examined in terms of the hydrolysis achieved and the volatile solids removed. The LBRs were used to examine the effect of temperature of the recirculation leachate and other biological factors to enhance hydrolysis and the removal of volatile solids. Under the best conditions, 23.9% of the feed material was hydrolyzed and the volatile solids removal was 31%.

Key Words: hydrolysis, leach bed reactor, napier grass, biogas

*Corresponding author; e-mail address: cwanna35@gmail.com

[1]Biotechnology Program, School of Agricultural Technology, Walailak University, Nakhon Si Thammarat 80161, Thailand

[2]Biomass and Oil Palm Center of Excellence, Walailak University, Tha Sala, Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand

[3]School of Engineering, Massey University, Palmerston North, New Zealand

INTRODUCTION

Anaerobic digestion is a cost-effective method that is used worldwide for commercial production of biogas from organic materials. Biomass of Napier grass (*Pennisetum purpureum*), a highly productive energy crop, is a potential feedstock for producing biogas through anaerobic digestion.

Energy crop biomass and other crop residues typically containing high total solids can be digested alone, or together with other materials, using either wet or dry digestion processes. The digestion process consists of an initial stage in which the carbohydrate and other complex polymers are hydrolyzed and converted to volatile fatty acids (VFAs). Methanogenic bacteria then convert the VFAs to biogas in a second stage, although both stages of the process may occur simultaneously in the same digester. For cellulose-rich substrates such as Napier grass, the initial hydrolysis is a slow rate-limiting step in the digestion process. Leach bed reactors (LBRs), a first stage reactor where hydrolysis and acidogenesis (production of VFAs) occur, have been developed especially for treating solid wastes including the biomass of energy crops (Nizami *et al*., 2010). LBRs are broadly applicable to any structured solid substrate. The solid feedstock is added to the LBR mixed with the inoculum. The solids form a loosely packed bed. The liquid leachate is continuously withdrawn from the bottom of the bioreactor and recirculated to the top (Chanakya *et al.,* 1993; Lissens *et al*., 2001). The organic matter in liquid leachate can be increased *via* several strategies such as biological pretreatment of substrate and high temperature process water (Haruta *et al.,* 2002; Hendriks *et al.,* 2009; Nizami *et al*., 2009). Liquid hot water could increase the hydrolysis rate of lignocellulosic material (Nizami *et al*., 2009) and Hussain *et al*. (2017) found that LBR operating under 50 °C conditions triggered fermentative microbial populations with higher hydrolytic and acidogenic activity in comparison to the operation under 37 °C. The application of LBRs has been studied using different substrates such as Perennial ryegrass (Nizami *et al*., 2010; Xie *et al*., 2012; Wall *et al*., 2016), Timothy grass (Lehtomaki *et al*., 2008), food waste (Browne *et al*., 2013) or cow manure (Shewani *et al*., 2015). However, to the best of our knowledge, the use of LBRs with Napier grass has not been explored. This research focused on the hydrolysis of Napier grass using LBRs with the aim of maximizing the efficiency of hydrolysis in terms of the volatile solids removal from the feed biomass and chemical oxygen demand (COD) production in the leachate.

MATERIALS AND METHODS

1. Materials

1.1 Napier grass

Napier grass (Pak Chong 1) (*Pennisetum purpureum*) from local farm in Nakhon Si Thammarat was harvested after 120 days of previous cutting. Fresh Napier grass was dried until the weight remained constant in a hot air oven at 105 °C to reduce the moisture content. Then, the biomass was ground in a hammer mill and sieved (sieve numbers 8 and 4) to obtain particles in the size range of 2.38–4.76 mm. The ground material was stored at room temperature until used. The measured characteristics of the Napier grass biomass are shown in Table 1.

Table 1 Characteristics of Napier grass, the seed culture and the anaerobic digester effluent

Parameter	Napier grass	Seed culture	Anaerobic digester effluent
Total solid (% w/w)	22.85±0.00	4.34±0.11	1.21±0.01
Total volatile solid (% w/w)	21.46±0.00	3.00±0.06	0.39±0.03
COD (g/g VS)	1.87±0.36	1.58±0.02	0.87±0.02
pH	5.42	6.8	8.2

1.2 Anaerobic digestion effluent and seed culture

Anaerobic digestion effluent was obtained from a mesophilic biogas digester used in treating palm oil mill effluent at the Southern Palm (1978) Co., Ltd., Thailand. The effluent was stored at 4 °C until required.

Seed culture was prepared using sludge from the above mentioned biogas plant. The sludge was mixed with the anaerobic digester effluent and tap water at a ratio of 3:1:4 (sludge: effluent: water by volume). Ground Napier grass (2 g/100 mL) was added and the seed culture was incubated in flasks for 5-7 days at 37 °C. Then, a further portion (2 g/100 mL) of ground grass was added and incubation was continued for a further 3-5 days. The feeding with grass was repeated a total of 4 times to acclimatize the microorganisms to this substrate. The cellulose-degrading bacteria were confirmed by streaking the acclimatized seed culture on the cellulose congo-red agar medium (Gupta *et al.,* 2011). Afterwards, the seed culture was filtered through a 500 micrometer nylon mesh to remove particulate solids and used for inoculation. The measured characteristics of the anaerobic digester effluent and the seed culture are noted in Table 1.

2. Pretreatment of Napier grass

Dry, ground Napier grass with a particle size of 2.38-4.76 mm was pretreated by mixing with the acclimatized seed culture (i.e. the inoculum) with the inoculum/substrate ratio of 0.05 and 0.10 (5 g of volatile solid (gVS) of inoculum/100 gVS of grass, or 10 gVS of inoculum/100 gVS of grass). The inoculum/substrate ratio is expressed as the amount of volatile solid (VS) originating from inoculum per the amount of VS in the substrate. This mixed slurry was incubated for 3 days at 37 °C.

3. Reactor design and operation

Four identical LBRs were used. Each reactor consisted of a cylindrical acrylic column (diameter = 12 cm) and a bottom conical funnel zone made of PVC (Figure 1). The effective volume of the LBR was 2 L. The reactor had a lid at the top. The height of the cylindrical reactor zone was 30 cm and the funnel had a height of 5 cm. A perforated aluminum sheet with 3 mm diameter holes was placed at the bottom of the cylindrical portion of the column to support the bed of the Napier grass substrate.

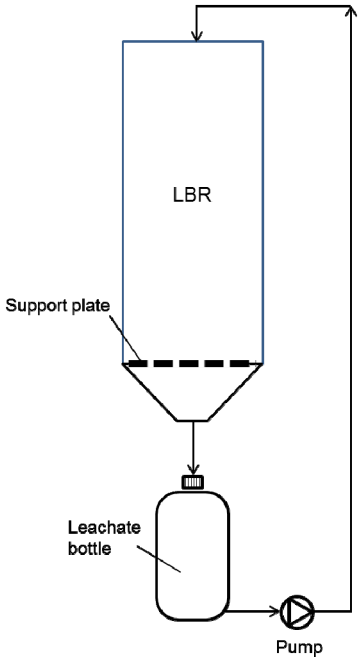


Figure 1 Reactor setup

A mesh with an opening size of 200 micrometers was placed under the perforated aluminum sheet to prevent loss of grass particles and a consequent blockage of the recirculation pipes (Figure 1). A custom made nozzle was placed at the top of the reactor for dispersing the recirculation liquid on top of the bed. The leachate from the bottom of the LBR was collected in a 2-L Duran® laboratory bottle containing a magnetic mixing bar (300 rpm). From this bottle the leached was recirculated to the top of the LBR using a peristaltic pump (model N6-6L Industrial Standard Peristaltic Pump with pump head DZ25-6L) (Figure 1).

4. Leaching experiments

Four separate leach bed reactors (LBR1–LBR4) were operated for 10 days in room temperature (35±1.0 ºC). Anaerobic digester effluent was added to the reactors at an initial liquid/solid ratio of 10 (1000 ml/100 g dry weight) and the recirculation was started. The recirculation pump (Figure 1) operated for 3 h each day with a flow rate of 6 L/h. LBR1 and LBR2 were filled with 100 g dry solids of Napier grass operated at room temperature (LBR1) or at 50 °C (LBR2). Leachate sample was collected each day at termination of recirculation. The volume of the leachate withdrawn in a sample was replaced with an equal volume of distilled water. At the end of each experiment, the dry weight of the grass residue and the total volatile solids were measured.

For LBR3 and LBR4, the reactors were modified to be airtight to assure an absence of aerobic respiration. All connecting points of the reactors were sealed with rubber seals and silicone sealant. The headspace was reduced by filling the reactor with 200 g dry solids of pretreated Napier grass with inoculum-to-substrate ratio (on VS basis) of 0.05 (LBR3), or 0.1 (LBR4). Anaerobic digester effluent at 50 °C was used for recirculation in these two reactors. Details of each leaching experiment are summarized in Table 2.

Table 2 Leaching experiments

Parameter	LBR1	LBR2	LBR3	LBR4
Recirculation rate (L/h)	6	6	6	6
Daily duration of recirculation (h)	3	3	3	3
Leachate temperature (°C)	Room temperature	50	50	50
Inoculum/substrate ratio (g/g)	0.05	0.05	0.05	0.10

5. Analytical methods

Total solids (TS), volatile solids (VS) and the pH were measured using methods 2540B, 2540E, and 4500H (Standard Methods, the American Public Health Association (APHA), 1998), respectively. The COD concentration was determined according to the closed reflux colorimetric method (method 5520D; APHA, 1998). The spectrophotometric absorbance was measured at 600 nm.

The hydrolysis yield is calculated according to Eq. (1) (J.D. Browne et al., 2013):

Hydrolysis yield (%) = Final COD/Initial total COD of grass x 100 (1)

The VS removal is calculated using Eq. (2) (J.D. Browne et al., 2013):

VS removal (%) = [Grass input (gVS) – Grass output (gVS)]/Grass input (gVS) x 100 (2)

RESULTS AND DISCUSSION

The changes in COD and pH over the 10-day duration of operation are shown in Figure 2 for the reactors LBR1–4. In LBR1 and LBR2, COD had declined dramatically at day 3 and continued to decline with time. The hydrolysis yields in LBR1 and LBR2 at the end of the runs were quite low at 3.2% and 4.2% (Table 3), respectively. This indicated a higher rate of COD degradation compared to the rate of hydrolysis. A high rate of COD removal suggested a lack of strictly anaerobic conditions in LBR1 and LBR2 as these reactors were operated under open conditions. Some of the hydrolyzed material was oxidized to carbon dioxide. These results are consistent with Nizami *et al*. (2010) and Browne *et al.* (2013) who observed aerobic respiration in leach bed system. The pH of the leachate in LBR1 and LBR2 continued to drop to below 7.5, but increased near the end of the experiment.

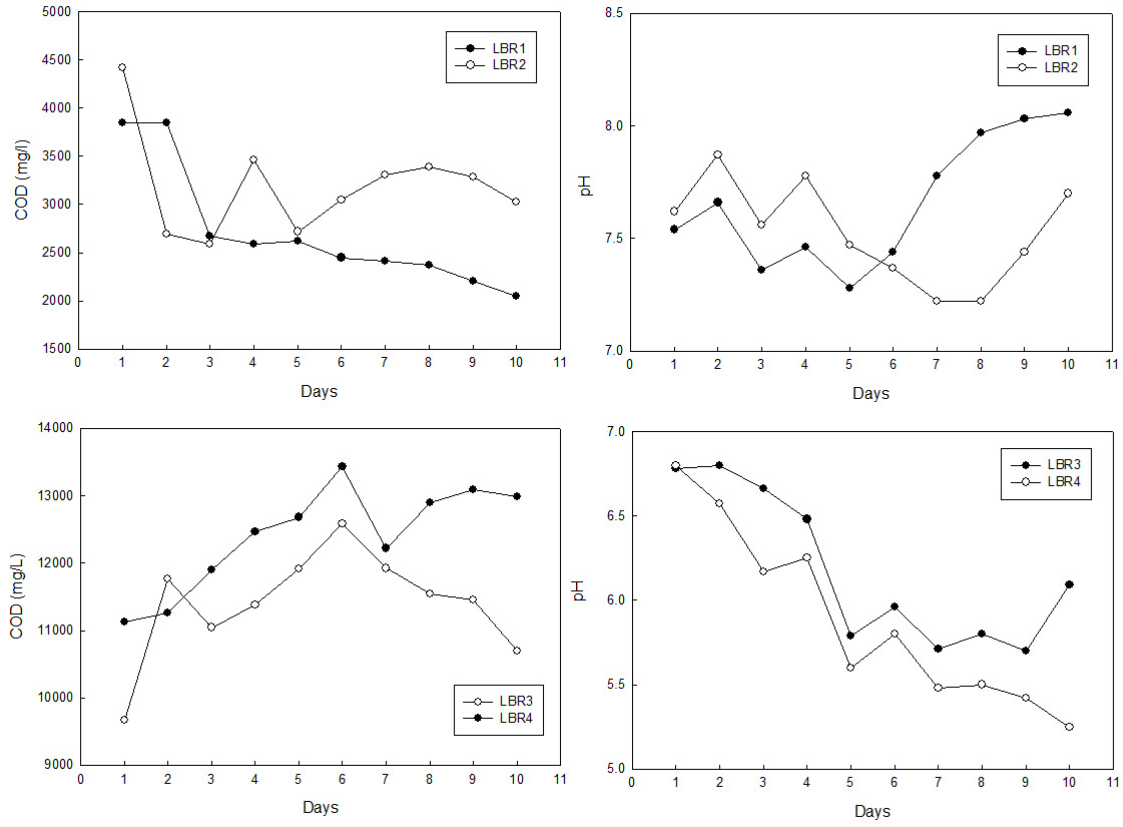


Figure 2 COD and pH variations in LBR1–4

The volatile solids (VS) removal is shown in Table 3. The VS removal in LBR2 was 31.0%, nearly 3% higher than in LBR1, a likely consequence of the higher operating temperature of LBR2. Furthermore, in LBR2, the final COD and the hydrolysis yield were higher compared to LBR1. This indicated that the higher temperature of the recirculating leachate improved the rate of hydrolysis. This is generally consistent with the known temperature effects on enzyme and microbial kinetics of solubilization of cellulose and hemicellulose (Nizami *et al.*, 2010) in substrates such as Napier grass.

To prevent the loss of COD in the reactors LBR1 and LBR2 that is caused by hydrolyzed material oxidizing to carbon dioxide, the reactor design was modified for a rigorous anaerobic operation.The vessels and other connections were sealed to be airtight. In the modified reactors (LBR3, LBR4), COD increased gradually and peaked on day 6 before declining. The hydrolysis yield in LBR3 increased to nearly 18% compared to 4.2% in LBR2. This indicates that when there's no loss of COD, the hydrolyzed material from grass is accumulated in the leachate resulting in higher COD. Therefore, maintaining strictly anaerobic conditions was important for preventing loss of COD and obtaining a high yield of hydrolysis. In both LBR3 and LBR4, the pH gradually declined to around 5.3–6.0 as a consequence of generation of volatile fatty acids (VFAs) (Lehtomaki *et al.*, 2008; Xie *et al.*, 2010; Cadavid-Rodriguez *et al.*, 2014).

Table 3 Summary of the results

Parameter	LBR1	LBR2	LBR3	LBR4
Grass input (g VS)	93.9	93.9	187.8	187.8
Grass output (g VS)	67.5	64.8	130.9	135.9
Final COD in leachate (g)	1.60	2.27	19.24	23.38
VS removal	28.1%[a]	31.0%[a]	30.3%[a]	27.6%[a]
Hydrolysis yield (%)	3.2%[c]	4.2%[c]	18.0%[b]	23.9%[a]

The data were analyzed by Turkey's test. The different superscript letters indicate a statistically significant difference ($p < 0.05$)

The highest hydrolysis yield of 23.9% was obtained in LBR4. A large inoculum (10% by volume) was used in this reactor compared to 5% used in LBR3. The better results in LBR4 are attributed to a larger initial inoculum as microorganisms are the catalysts for the hydrolysis (Yuan *et al.,* 2014).

In this study, the highest hydrolysis yield of 23.9% and the highest VS removal of 31.0% were obtained within 10 days while Xie *et al*. (2012) who evaluated hydrolysis of grass silage in LBR obtained the hydrolysis yield up to 57% and VS removal of 55% within 34 days. Nizami *et al*. (2010) also investigate the efficiency of LBR using grass silage as a substrate and 40 °C recirculation water and reported 67% of the hydrolysis yield and 64% of VS removal in 30 days. Therefore, the longer operation of LBR3 and LBR4 is recommended to help achieve higher hydrolysis yield and VS removal.

CONCLUSION

Leach bed reactors were effective for hydrolysis of Napier grass solids. Maximum hydrolysis yield was obtained under anaerobic conditions. Addition of an acclimatized seed culture and the use of heated leachate (50 °C) in recirculation enhanced the hydrolysis yield and removal of volatile solids. An operating period of longer than 10 days is recommended for improving the extent of hydrolysis.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from Office of the Higher Education Commission and Thaksin Palm (2521) Co., Ltd., Thailand, is gratefully acknowledged.

REFERENCES

Browne, J.D., E. Allen and J.D. Murphy. 2013. Improving hydrolysis of food waste in a leach bed reactor. **Waste Management** 33: 2470-2477.

Cadavid-Rodriguez, L.S. and N.J. Horan. 2014. Production of volatile fatty acids from wastewater screenings using a leach-bed reactor. **Water Research** 60: 242-249.

Chanakya, H.N., K.G. Srikumar, V. Anand, J. Modak and K.S. Jagadish. 1999. Fermentation properties of agro-residues, leaf biomass and urban market garbage in a solid phase biogas fermenter. **Biomass and Bioenergy** 16: 417-429.

Gupta, P., K. Samant and A. Sahu. 2012. Isolation of Cellulose-Degrading Bacteria and Determination of Their Cellulolytic Potential. **International journal of microbiology** 2012:5

Haruta, S., Z. Cui, Z. Huang, M. Li, M. Ishii and Y. Igarashi. 2002. Construction of a stable microbial community with high cellulose-degradation ability. **Applied microbiology and biotechnology** 59; 529-34.

Hendriks, A.T.W.M. and G. Zeeman. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology** 100: 10-8.

Hussain, A., M. Filiatrault and S.R. Guiot. Acidogenic digestion of food waste in a thermophilic leach bed reactor: Effect of pH and leachate recirculation rate on hydrolysis and volatile fatty acid production. **Bioresource Technology** 245; 1-9.

Lehtomaki, A., S. Huttunen, T. Lehtinen and J.A. Rintala. 2008. Anaerobic digestion of grass silage in batch leach bed processes for methane production. **Bioresource Technology** 99: 3267-3278.

Lissens, G., P. Vandevivere, L. De Baere, E.M. Biey and W. Verstrae. 2001. Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion. **Water Science & Technology** 44: 91-102.

Nizami, A.S., N.E. Korres and J.D. Murphy. 2009. Review of the integrated process for the production of grass biomethane. **Environmental science & technology** 43; 8496-508.

Nizami, A.S., T. Thamsiriroj, A. Singh and J.D. Murphy. 2010. Role of leaching and hydrolysis in a two-phase grass digestion system. **Energy & Fuels** 24: 4549-4559.

Xie, S., P.G. Lawlor, J.P. Frost, G. Wu and X. Zhan. 2012. Hydrolysis and acidification of grass silage in leaching bed reactors. **Bioresource Technology** 114: 406-413.

Yuan, X., B. Wen, X. Ma, W. Zhu, X. Wang, S. Chen and Z. Cui. 2014. Enhancing the anaerobic digestion of lignocellulose of municipal solid waste using a microbial pretreatment method. **Bioresource Technology** 154: 1-9.

Production of Mechanical Pulp from Oil Palm Frond

Jarawee Leksuksri[1], Nikhom Laemsak[1] and Phichit Somboon[1*]

ABSTRACT

Current technology of the mechanical pulping is developed for wood based raw materials, which could not be applied for the oil palm fronds. Moreover, the oil palm fronds contained a high parenchyma tissue in their structures, which reduces the quality of pulp and negative effects on papermaking process and paper quality. Therefore, the mechanical pulping is needed be modified in order to perform with oil palm fronds. The objectives of this research were to study the removing of parenchyma tissue from oil palm frond, and to study the production of mechanical pulp. The result of this study was found that the removing of parenchyma tissue from the fiber bundles could be done efficiently. The mechanical pulp could be produced from the oil palm frond fiber bundles, which the final pulps were treated to the desired quality at freeness of about below 100 ml. The quality of the tested mechanical pulp was close to industrial pulp, which could be applied for produce the chemical free packaging paper or food contact paper products.

Key Words: oil palm residues, oil palm frond, mechanical pulp, refiner, paper

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

[1] Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

In Thailand, it has been reported that the oil palm residues are about one million tons including trunks, empty fruit bunches and fronds (Office of Agricultural Economics, 2016). Currently, many valuable bio-products have been produced by using the trunks and the empty fruit bunches because these raw residues are easy to manage and handle. Another residue is the oil palm frond, which is available when the palms are pruned and during the fruit harvests. This residue is more difficult to correct and transport out of the cultivation areas. Generally, the frond residues are left on the cultivated areas to decompose and fertilize the soil (Wan Rosli and Law, 2011). However, many research works reported that the oil palm fronds comprise with a longer fibers than others residues, which is potentially could be used to produce the paper pulp. Therefore, this research project focused on utilization of the oil palm fronds to produce the mechanical pulp, which the obtained pulp could be applied for the production of the chemical free paper packaging products.

Oil palm fronds are basically consisted of vascular bundles imbedded in parenchyma ground tissues (Abdul Khalil et al., 2006). Their chemical composition of oil palm frond consist holocellulose about 83%, lignin about 20% and extractives about 4% (Abdul Khalil et al., 2008 and Hashim et al., 2011). For chemical pulp of oil palm frond, fiber length was about 1.13 millimeters, cell wall thickness was about 3.97 micrometers, fiber width was about 19.60 micrometers and fiber coarseness was about 0.098 mg/m (Wan Rosli et al., 2007). According to their fiber morphology and chemical composition, this raw material has fiber length longer than empty fruit bunch and hardwood fiber (Law et al., 2007), which potentially could be used to produce the mechanical pulp.

Mechanical pulping refers to the pulping process based on the mechanical treatment which has no chemical contain in this pulp. Fundamental mechanism of mechanical pulping is that applied cyclic force, and consequently converted to thermal energy. The thermal energy softens lignin where bound fibers together meanwhile the lignocellulosic materials are absorbed mechanical energy causing fibers broken down and separated from each other producing the pulp (Salmén et al., 1998). The pulping process based on this mechanism, the raw materials are thus required to be a long fiber element.

However, the current technology of the mechanical pulping is developed for wood based raw materials, which could not be applied for the oil palm fronds. Moreover, the oil palm fronds contained a high parenchyma tissue in their structures, which reduces the quality of pulp and negative effects on papermaking process and paper quality. Therefore, we need to modify pulping process which can perform effectively with oil palm frond. The objectives of this research were to study the removing of parenchyma tissue from oil palm frond, and to study the production of mechanical pulp having the quality for papermaking.

MATERIALS AND METHODS

1. Materials

Raw material used in this study was oil palm frond residues. The fronds were from harvesting areas having length of about 200 centimeters. The oil palm fronds were chipped and dried at the Pulp and Paper Technology Laboratory, Kasetsart University. The dried chips were screened with the sieve number of 16.

Mechanical pulping equipment was using the laboratory high consistency refiner at the Pulp and Paper Technology Laboratory, Kasetsart University. The mechanical pulping refiner equipped with various types of treatment plates including the mechanical coarse bar plate (MCB plate), the mechanical fine bar plate (MFB plate) and the thermo mechanical pulping plate (TMP plate).

2. Methods

The experiments consists of three parts including the removal of parenchyma tissue from the oil palm fronds called the fiber bundle preparation process, the mechanical pulping process, and the evaluation of the obtained mechanical pulp.

2.1 Fiber bundle preparation process

The dried oil palm frond chips were soaked with water to the saturated point and dewatered using the laboratory centrifugal device to dryness of 30 %. The treated chips were fed to the refiner equipped with the coarse bar plates and the saturated steam line. The plate gap clearances were controlled at 500 and 1000 micrometer. The steam pressure was controlled at 0 and 2 bar. The removal of the obtained fiber bundles and parenchyma tissue were collected and dried. The fiber bundles and parenchyma tissue were separated using the screen with sieve number of 30 mesh. The amount of fiber bundles and their quality were analyzed.

2.2 Production of mechanical pulp

The mechanical pulping process consisted of 2 stages including defibering stage and fibrillating stage. The first stage called defibering stage had the objective to separate the oil palm frond fiber bundles into a single fiber. The fiber bundles were soaked with water to the saturated point and dewatered to dryness of 30%. The soaked fiber bundles were fed into the mechanical pulping refiner installed with the mechanical fine bar plate (MFB plate) and saturated steam line. The plate gap clearances were controlled at 100, 150 and 200 micrometer. The fed steam was controlled at pressure of 0 and 2 bar. The obtained first stage pulp was disintegrated with a hot latency removal according to ISO 5263-3. The fibers were analyzed and classified using a Bauer-McNett classifier according the standard TAPPI T 233.

The second stage had the objective to generate external and internal fibrillation of the first stage pulp to the desired quality for making paper products. The first stage pulp was controlled at consistency of 10%, and fed to the refiner equipped with the thermo mechanical plate (TMP plate) and the steam line. The gap clearance of TMP plates was controlled at between 100-180 micrometer. The steam pressure was control at 0 and 2 bar as shown in Figure1. The degrees of refining were controlled based on the number of pulp passing the refiner, which controlled at 2-8 passes. The tested pulp was sampled during the pulp circulated passing through the refiner at 2, 4, 6, 8 passes

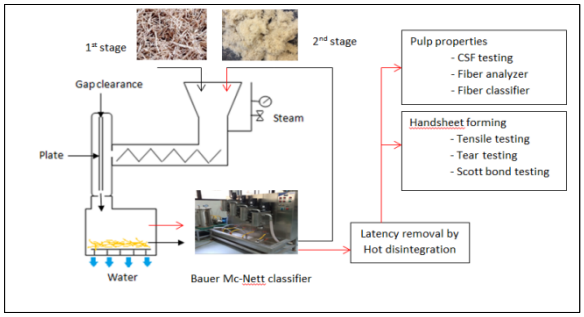


Figure 1 Mechanical pulping process.

2.3 Fiber morphology and handsheet properties

The tested pulps were disintegrated with a hot disintegration to remove the latency according to standard ISO 5263-3 before testing. The drainability of pulp suspension was measured by using a Canadian Standard Freeness (CSF) apparatus following standard ISO 5267-2. The fiber fractionation was analyzed by using a Bauer-Mc-Nett classifier following standard TAPPI T 233. Fiber morphology including fiber length, fiber width, fiber coarseness and fines content was analyzed by using a FQA analyzer following standard ISO 16065-1. Fiber images were investigated by using a light microscope. Laboratory sheets were formed for evaluation of pulp quality according to standard ISO 5269-1. Physical and mechanical properties of the laboratory sheets were tested according ISO and TAPPI standard methods.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Removing parenchyma tissue and production of fiber bundles from oil palm fronds

The result was found that the fiber bundles could be separated from parenchyma tissue effectively. Fiber bundles produced was about 80-90% and parenchyma tissue (called pith) was about 10-20% as shown in Table 1 and Figure 2. The removing of parenchyma tissue was found that the gap clearance of refiner plates and steam used had an effect on the removing efficiency. The optimum operating conditions of parenchyma removing to produce fiber bundles were performed under the gap clearance of 500 micrometer and removing without steam use. Increasing of gap clearance up to 1,000 micrometer reduced the removal parenchyma tissue efficiency because the

gap was bigger than the diameter of fiber bundles, which is about 500 micrometer (Shinoj et al., 2011). The obtained fiber bundles without parenchyma tissue produced in this part was used as the fed raw materials for mechanical pulping process, while the separated parenchyma tissue could be used for production of the other products such as the particle boards and biofuel.

a) b) c)

Figure 2 Fiber bundles (a), parenchyma tissue (b), and fines (c).

Table 1 Percentage of fiber bundle production, parenchyma tissue, and fines

Operating condition		Separated components of oil palm frond (% w/w)		
Steam (bar)	Gap clearance (μm)	Fiber bundles	Parenchyma tissues	Fines
0	500	81.32	17.51	1.17
	1000	90.21	7.18	2.61
2	500	86.82	12.15	1.20
	1000	93.00	5.49	1.51

2. Production of mechanical pulp and their quality

In the defibering process, the results was found that the fiber bundles of oil palm fronds could be separated into a single fibers (P200-R28) of about 47.14-87.24% as shown in Table 2. The separation of fibers depended on the gap clearance and the steam used. To produce the first stage pulp with high amount of single fiber content, the defibering process was performed with 2 passes. The first pass of defibering operated with wider gap clearance of 200 micrometer and the second pass operated with the narrow gap of 100 micrometer without steam used. The obtained first stage pulp was collected and used as the fed materials for further refining to the desired quality for making paper products. In the fibrillating stage, the results were found that the final mechanical pulp with the desired quality could be produced as shown in Figure 3. The pulp was manipulated closed to the industrial pulp at pulp drainability below 100 ml by using the pulp circulation through the refining of about 8 passes. The obtained pulps were disintegrated with a hot condition before testing their properties.

The pulp quality was found that the final pulp contained with freeness of 25-50 ml having the short and long fiber fraction of about 54-65.96 % and fines content of 33.84-45.49%, which closed to

the industrial pulp as shown in Table 3 and Figure 4. According to the fiber morphology analysis, it was found that the fiber length was about 0.721-0.741 mm. The fiber width was about 30 micrometers. Fiber coarseness was about 0.159-0.175 mg/m as shown in Table 4. The tested pulps were formed into the laboratory sheets and analyzed their properties. It found that the tensile strength was in a range of 13-26 Nm/g. The tear resistance was in a range 3-4 mN.m2/g. The internal bond was in a range 300-600 J/m^2 as shown in Table 5. This pulp quality was closed to the quality of industrial mechanical pulp (Blechschmidt and Heinemann, 2006, and Heikkurinen et al, 1998), which is applied for production of paperboard, food contact paper, and paper packing products. Therefore, the mechanical pulp from oil palm fronds could be also applied for making the chemical free packaging paper or food contact paper products.

Table 2 Percentage of fiber fractionation in the defibering stage

Operating conditions		Percentage of fiber fractionation				
Steam (bar)	Gap clearance (μm)	R14	R28	R48	R200	P200
0	200 (1st pass)	44.33	16.86	10.53	12.10	16.19
	100 (2nd pass)	12.76	20.29	21.11	10.46	35.39
2	200 (1st pass)	52.86	9.56	10.20	2.59	24.80
	100 (2nd pass)	29.85	24.35	19.21	11.21	15.39

Table 3 Percentage of fiber fractionation in the fibrillating stage

Operating conditions		Percentage of fiber fractionation				
Steam (bar)	Gap clearance (μm)	R14	R28	R48	R200	P200
0	180,150,120,100 (8 passes)	0.20	3.61	14.04	36.67	45.49
2	180,150,120,100 (8 passes)	0.20	8.92	20.57	36.48	33.84

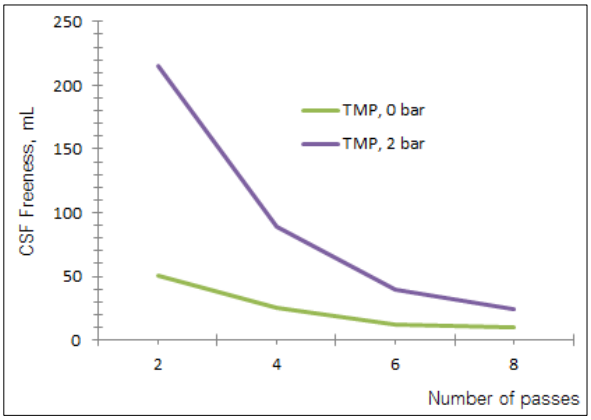


Figure 3 Drainability (CSF freeness) of oil palm frond pulp in deferent gap clearance level.

Table 4 Fiber morphology of oil palm frond.

Steam (bar)	Fiber length (mm)		Fiber width (μm)		Fiber coarseness (mg/m)		Fines (%)	
	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final
0	0.745	0.721	30.3	30.0	0.188	0.175	19.85	20.75
2	0.849	0.741	31.1	30.0	0.184	0.159	16.80	18.95
TMP pulp*	0.74 -1.23		29 - 34		-		-	

* Spruce TMP pulp, CSF 80-240 mL (Peltola et al., 2011)

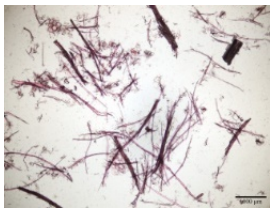
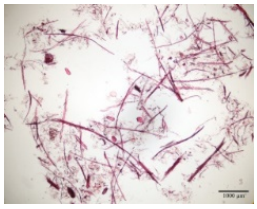
a)  b) 

Figure 4 OPF fiber at CSF 500 ml (a) and CSF 50 ml (b), using light microscope (40X).

Table 5 Mechanical properties of laboratory sheet of oil palm frond pulp.

Pulp freeness (mL)	Properties			Remark
	Tensile index (mN/g)	Tear index (mNm2/g)	Internal bond index (J/m2)	
25	26.09	3.92	604.76	
51	21.29	3.95	513.83	
90	19.10	4.16	390.60	
215	13.96	3.87	285.72	
100-300	10 - 30*	2 - 6*	200-300**	Industrial pulp

* Norway spruce SGW and PGW pulp (Blechschmidt and Heinemann, 2006)

** Norway spruce, TMP pulp (Somboon and Paulapuro, 2008)

CONCLUSION

The production of mechanical pulp from the oil palm fronds could be carried out by using the modified mechanical pulping process including the parenchyma tissue removal and mechanical pulp refining. The parenchyma tissue removing from the fiber bundles could be done efficiently depended on the depithing plate and steam use. The mechanical pulp could be produced from the oil palm frond fiber bundles, which the final pulps were treated to the desired quality at freeness of about below 100 ml. The quality of the tested mechanical pulp was closed to industrial pulp, which could applied for produce the chemical free packaging paper or food contact paper products.

ADKNOWLEDGEMENTS

This paper was completed in the Laboratory of Pulp and Paper Technology of Kasetsart University. I would like to express my sincere thanks to my thesis advisor, Assist. Prof. Dr. Phichit Somboon and co-Advisor, Assist. Prof. Dr. Nikhom Laemsak. I am most grateful for teaching and advice.

REFERENCES

Abdul Khalil H.P.S., M.S. Alwani and A.K.M. Omar. 2006. Chemical Composition, Anatomy, Lignin Distribution and Cell Wall Structure of Malaysian Plant Waste Fibers. **BioResourse.** 1(2): 220-232.

Abdul Khalil H.P.S., M.S. Alwani, R. Ridzuan, H. Kamarudin and A. Khairul. 2008. Chemical Composition, Morphological Characteristics and Cell Wall of Malaysian Oil Palm Fibers. **Poly-Plastic Technology and Engineering**. 43 (3): 273- 280.

Blechschmidt J. and S. Heinemann. 2006. Latency and properties of mechanical pulp, p. 1140. In H. Sixta, eds. **Handbook of pulp**. Weinheim, Germany.

Hashim R., W.N.A. Wan Nadhari, O. Sulaiman, F. Kawamura, S. Hiziroglu, M. Sato, T. Sugimoto, T.G. Seng and R. Tanaka. 2011. Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from oil palm biomass. **Materials and Design**. 32: 246–254.

Heikkurinen A. and L. Leskela. 1998. The character and properties of mechanical pulps, pp. - . In J. Gullichsen and H. Paulapuro, eds. **Book5 Mechanical pulping**. Helsinki, Finland.

Law N.M., W.R. Wan Daud and A. Ghazali. 2007. Morphological and chemical nature of fiber strands of oil palm empty fruit bunch (OPEFB). **BioResources**. 2(3): 351-362.

Office of Agricultural Economics. 2016. **Oil Palm**. Available Source: http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=13577, September 9, 2559.

Peltola H., E. Laatikainen and P. Jetsu. 2011. Effects of physical treatment of wood fibres on fibre morphology and biocomposite properties. **Plastics Rubber and Composites**. 40(2): 86-92.

Salmén L., M. Lucander, E. Härkönen and J. Sundholm. 1998. Fundamental mechanisms in refining, pp -. In Gullichsen J. and H. Paulapuro, eds. **Book 5 Mechanical pulping**. Helsinki, Finland.

Shinoj S., R. Visvanathan, S. Panigrahi and M. Kochubabu. 2011. Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. **Industrial Crops and Products**. 33: 7–22.

Somboon P. and H. Paulapuro. 2008. Surface mechanical treatment of TMP pulp fibers using grit material. **TAPPI Journal**. 7(12): 4-9.

Wan Rosli W.D., Z. Zainuddin, K.N. Law and R. Asro. 2007. Pulp from oil palm fronds by chemical processes. **Industrial Crops and Products**. 25: 89-94.

Wan Rosli W.D. and K.N. Law. 2011. Review of oil palm fibers. **BioResources**. 1: 901- 917.

ผลของการเติมไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูงต่อสมบัติของไขมันทดแทนเนยโกโก้ชนิดไขมันลอริค

Effect of High Melting Fat Addition on Properties of Cocoa Butter Substitute

ภัทราภรณ์ อินทร์บำรุง[1*] และ โสภาค สอนไว[1]

Patraporn Inbumrung[1*] and Sopark Sonwai[1]

บทคัดย่อ

การผลิตช็อกโกแลตในเขตภูมิอากาศร้อน เช่น ประเทศไทย ที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของเนยโกโก้ในช็อกโกแลต ทำให้เกิดการหลอมเหลวของไขมันบางส่วนหรือทั้งหมด ขณะทำการเก็บรักษา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการทนต่อความร้อนของไขมันทดแทนเนยโกโก้ชนิดไขมันลอริค จากการศึกษาการเติมไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูง 2 ชนิดที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 60 และ 80% (w/w) พบว่าความแตกต่างของชนิดและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ มีผลต่อความเข้ากันได้และอุณหภูมิในการหลอมเหลวของไขมันผสม จากการเติมน้ำมันเมล็ดปาล์มที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชั่นแบบสมบูรณ์ที่มีกรดไขมันหลัก คือ กรดลอริก กรดไมริสติก และกรดสเตียริก จะส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวของไขมันผสมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และมีส่วนเพิ่มอัตราเร็วในการตกผลึกด้วย ขณะที่การเติมไขมันจากเมล็ดกระบกที่มีกรดไขมันหลักคือ กรดลอริก และกรดไมริสติก ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 40% (w/w) ทำให้เกิดความไม่เข้ากันของไขมันผสมที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ยูเทคติก เป็นผลมาจากความแตกต่างของกรดไขมันภายในไขมันผสม ทำให้ไขมันผสมเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำลง และเกิดการชะลอการตกผลึกของไขมันผสมร่วมด้วย

ABSTRACT

The production of chocolate in tropical countries such as Thailand, which has an average temperature close to the melting point of cocoa butter (CB) in chocolate, results in the melting of some or all of the fat in chocolate during storage. Because this is necessary to replace CB in chocolate with cocoa butter substitute (CBS), which has higher melting temperature to improve the heat resistant properties. Therefore, this work was aimed to improve the heat-resistant ability of the CBS even further by adding high melting fats. The two high melting fats used in this work are fully hydrogenated palm kernel oil (FHPKO) and krabok seed fat (KSF) at concentrations of 10, 20, 30, 40, 60 and 80% (w/w). The main fatty acids of FHPKO are lauric, myristic and stearic acid and KSF comprises mainly of lauric and myristic acid. Blends of FHPKO and CBS showed a slight increase in the melting temperature and rate of crystallization. Blends of KSF and CBS at concentration higher than 40% (w/w), showed incompatibility of fats called eutectic behavior with a decrease in melting temperature.

Key Words: cocoa butter substitute, high melting fats, compound chocolate, additive effects

* Corresponding author; e-mail address: **kluaygm1993@gmail.com**

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

[1]Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000

คำนำ

ช็อกโกแลตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทขนมหวานที่ได้รับความนิยมในการบริโภคอย่างแพร่หลายทั่วโลก นอกเหนือจากมีรสชาติหอมหวาน ยังอุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหาร และมีคุณลักษณะเด่นเฉพาะตัว คือ อยู่ในรูปของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (25-30°C) แต่หลอมเหลวอย่างรวดเร็วเมื่อรับประทาน (อุณหภูมิร่างกาย) เป็นเพราะไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของช็อกโกแลตที่มีชื่อว่าเนยโกโก้ (Jahurul *et al.*, 2013) แต่ในปัจจุบันการผลิตช็อกโกแลตในประเทศที่มีภูมิอากาศร้อน เช่น ประเทศไทย จะพบปัญหาการหลอมเหลวของไขมันบางส่วนหรือทั้งหมดของช็อกโกแลต เพราะมีอุณหภูมิเฉลี่ยใกล้เคียงหรือสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเนยโกโก้ ก่อให้เกิดผลเสียต่อผลิตภัณฑ์ขณะทำการเก็บรักษา จึงจำเป็นต้องทำการดัดแปรชนิดของไขมันในช็อกโกแลตไปเป็นไขมันทดแทนเนยโกโก้ ที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าเนยโกโก้ โดยจะเรียกผลิตภัณฑ์ดังกล่าวว่า ช็อกโกแลตเคลือบ ซึ่งไขมันทดแทนเนยโกโก้ชนิดไขมันลอริคเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มักใช้ทดแทนเนยโกโก้ในการผลิตช็อกโกแลตเคลือบ เนื่องจากไขมันทดแทนเนยโกโก้ชนิดไขมันลอริคจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น มีความสามารถด้านการทนความร้อน ทำให้ลักษณะปรากฏมีความเรียบเนียนดังเช่นผลิตจากเนยโกโก้ และไม่เกิดไขในปาก นอกจากการดัดแปรชนิดของเฟสไขมันแล้ว การพัฒนาการทนความร้อนของช็อกโกแลตยังสามารถทำร่วมกับวิธีอื่นได้ด้วย คือ การทำปฏิกิริยาอินเตอร์เอสเตอร์ริฟิเคชั่น หรือทำการเติมไขมันแข็งลงไปในเฟสไขมัน (Stortz and Marangoni, 2011)

จากการศึกษาของ Ribeiro *et al.* (2013) ได้ทำการเติมไขมันแข็ง 5 ชนิด ที่ได้จากการนำน้ำมันพืชไปผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชั่นแบบสมบูรณ์ เติมลงในเนยโกโก้ พบว่าการเติมไขมันแข็งที่มีกรดไขมันที่เหมือนกับเนยโกโก้จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเสถียรยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมไขมันแข็งจากน้ำมันเคมเบ้ ที่มีกรดไขมันอิ่มตัวชนิดกรดเบเฮนิกซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก จะทำให้ตัวอย่างมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น และยังชะลอการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก V เป็น V_1 เพื่อป้องกันการเกิด fat bloom ในช็อกโกแลตได้ด้วย ในขณะเดียวกันการเติมไขมันแข็งจากน้ำมันเมล็ดปาล์มกลับพบว่ามีส่วนทำให้เกิดการชะลอการตกผลึกของเนยโกโก้ เนื่องจากความแตกต่างของกรดไขมันของเนยโกโก้ที่ประกอบด้วยกรดปาล์มมิติก กรดโอเลอิก และกรดสเตียริก เป็นหลัก ในขณะที่ไขมันแข็งจากน้ำมันเมล็ดปาล์มมีส่วนประกอบของกรดลอริกเป็นจำนวนมาก จึงก่อให้เกิดความไม่เสถียรต่อผลิตภัณฑ์ได้ โดยเฉพาะกับการเติมในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูเทคติก และลดจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ลง

งานวิจัยนี้ได้มุ่งศึกษาการเติมไขมันลอริคที่มีจุดหลอมเหลวสูงลงในไขมันทดแทนเนยโกโก้ชนิดไขมันลอริคทางการค้า ได้แก่ น้ำมันเมล็ดปาล์มที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชั่นแบบสมบูรณ์ และไขมันจากเมล็ดกระบก โดยศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมัน พฤติกรรมการหลอมเหลว ปริมาณไขมันแข็ง และรูปร่างผลึก เพื่อเป็นแนวทางแก้ปัญหาการหลอมเหลวของไขมันบางส่วนหรือทั้งหมดของช็อกโกแลตเคลือบในระหว่างการเก็บรักษา

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

นำไขมันทดแทนเนยโกโก้ชนิดไขมันลอริคทางการค้า (Commercial cocoa butter substitute หรือ CBS) น้ำมันเมล็ดปาล์มที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชั่นแบบสมบูรณ์ (Fully hydrogenated palm kernel oil หรือ FHPKO) และไขมันจากเมล็ดกระบก (Krabok seed fat หรือ KSF) ไปหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 80°C เป็น

เวลา 10 นาที และทำการเติมน้ำมันเมล็ดปาล์มที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชั่นแบบสมบูรณ์ หรือไขมันจากเมล็ดกระบก ลงในไขมันทดแทนเนยโกโก้ชนิดไขมันลอริคทางการค้าที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 60 และ 80% (w/w) และทำการกวนผสมต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิไม่เกิน 5°C เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับตัวอย่าง

การศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมันในตัวอย่าง

ใช้เครื่อง Gas Chromatography แบบ Flame Ionization Detector (GC-FID) ของบริษัท Shimadzu รุ่น GC-2010 โดยใช้ Column VertiBond™ wax (stationary phase คือ 100% polyethyleneglycol ความยาว 50 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ความหนาของฟิล์ม 0.20 ไมโครเมตร) ทำการเตรียมตัวอย่างเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันตามกรรมวิธีของ AOAC (AOAC 963.33) และใช้สภาวะในการวิเคราะห์คือ อุณหภูมิ injector เท่ากับ 210°C อุณหภูมิ FID เท่ากับ 280°C อุณหภูมิ oven เริ่มต้นที่ 120°C คงไว้ 3 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 10°C/min จนถึง 220°C คงไว้ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งด้วยอัตรา 5°C/min จนถึง 240°C คงไว้ 30 นาที และใช้ฮีเลียมเป็น carrier gas ทำการวิเคราะห์ค่า retention time ด้วยวิธี external standard เปรียบเทียบกับกรดไขมันมาตรฐานต่างๆ และทำการคำนวณปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างจากพื้นที่ใต้พีคของกรดไขมันชนิดต่างๆ ที่ได้จากโครมาโตแกรม (chromatograms) ภายหลังการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FID

การศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลว

ศึกษาตามวิธีของ AOCS (Cj 1-94) (AOCS, 1998) โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC 8000 PerkinElmer โดยหลอมเหลวตัวอย่างที่อุณหภูมิ 80°C แล้วชั่งตัวอย่างประมาณ 3-5 มิลลิกรัม ใส่ aluminium pan และปิดฝา จากนั้นนำตัวอย่างใส่เครื่อง DSC ให้ความร้อนตัวอย่างที่ 80°C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อเป็นการทำลายผลึกไขมัน ลดอุณหภูมิลงมาที่ -60°C ด้วยอัตรา 5°C/min แล้วคงไว้ที่ -60°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 80°C ด้วยอัตรา 5°C/min และบันทึกผลเป็นกราฟ (thermogram) ของการหลอมเหลว

การศึกษาปริมาณไขมันแข็งที่อยู่ในรูปผลึก

ใช้เครื่อง Pulsed-Nuclear Magnetic Resonance หรือ *p*-NMR ของบริษัท BRUKER รุ่น the minispec mq20 ตามกรรมวิธีของ Fiebig and Luttke (2003) โดยเทตัวอย่างที่หลอมเหลวแล้วลงในหลอดสำหรับเครื่อง *p*-NMR โดยให้มีปริมาตรตัวอย่าง 3-4 มิลลิลิตร หลังจากนั้นหลอมเหลวตัวอย่างที่ 80°C เป็นเวลา 10 นาที และหลอมเหลวต่อที่ 60°C เป็นเวลา 5 นาที เก็บตัวอย่างที่ 0°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเก็บในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่จะศึกษา (10-50°C) เป็นเวลา 30 นาที และทำการวัดค่าปริมาณของแข็งในรูปผลึกด้วยเครื่อง *p*-NMR ต่อไป

การศึกษาลักษณะรูปร่าง จำนวน และขนาดของผลึก

ศึกษาโดยใช้เครื่อง Polarized Light Microscopy (PLM) รุ่น Olympus CH-2 (ประเทศญี่ปุ่น) ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิตอล Olympus CAMEDIA digital camera (model NO. C-7070 Wide Zoom, 7.1 Megapixel, Japan) โดยนำตัวอย่างไปหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 80°C พร้อมกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที เพื่อเป็นการทำลายผลึกไขมัน จากนั้นปิเปตตัวอย่างที่หลอมเหลวแล้วปริมาตร 10 ไมโครลิตร หยดลงบนกระจกสไลด์และปิดทับด้วยกระจกปิดสไลด์ นำไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาส่องดูลักษณะรูปร่าง จำนวน และขนาดผลึกด้วยเครื่อง PLM ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิตอลที่กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุเท่ากับ 100

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ซ้ำในแต่ละตัวอย่าง โดยวางแผนการทดลองตามวิธี Completely Randomize Design และทำการวิเคราะห์สถิติด้วยโปรแกรม SPSS version 10.0 โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ชนิดและปริมาณกรดไขมันในตัวอย่าง

กรดไขมันหลักที่พบใน CBS ทางการค้า ประกอบด้วย กรดลอริก 44.08% กรดไมริสติก 13.67% และกรดสเตียริก 29.81% ในขณะที่ไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูง คือ FHPKO จะมีกรดลอริกปริมาณสูงถึง 50.14% กรดไมริสติก 17.12% และกรดสเตียริก 17.63% และ KSF มีปริมาณกรดลอริก 44.22% และกรดไมริสติก 46.65% ในปริมาณใกล้เคียงกัน แสดงถึงชนิดและปริมาณกรดไขมันที่มีความหลากหลายของไขมันแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อความสามารถในการเข้ากันได้ และการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของจุดหลอมเหลว (Ribeiro *et al*., 2013) ของไขมันผสมที่ความเข้มข้นต่างๆ กล่าวคือกรดไขมันที่มีสายคาร์บอนยาวเช่น กรดสเตียริก จะมีส่วนทำให้ไขมันมีจุดหลอมเหลวเพิ่มมากขึ้น

พฤติกรรมการหลอมเหลว

Figure 1 แสดงพฤติกรรมการหลอมเหลวของไขมันผสม คือ การศึกษาการดูดความร้อนของตัวอย่าง ซึ่ง CBS ทางการค้า มีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวค่อนข้างกว้างที่อุณหภูมิ 11.0-45.1°C เป็นผลมาจากองค์ประกอบของกรดไขมันที่หลากหลายภายในตัวอย่าง ในขณะที่ไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูงที่ใช้เติมคือ FHPKO และ KSF จะมีอุณหภูมิการหลอมเหลว คือ 13.9-45.9°C และ 26.6-41.8°C ตามลำดับ สำหรับไขมันผสมระหว่าง CBS ทางการค้าที่มีการเติม FHPKO จะเห็นว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของ CBS ทางการค้าและ FHPKO จะมีช่วงอุณหภูมิค่อนข้างใกล้เคียงกัน ทำให้การเติม FHPKO ลงไปใน CBS ทางการค้า ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะมีการเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมเหลวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ไม่เกิน 1°C) เป็นผลมาจากปริมาณกรดลอริกที่ลดลง และกรดสเตียริกที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ต่างกับ KSF ซึ่งมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวต่ำกว่า CBS ทางการค้า และมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวต่ำกว่า CBS ทางการค้า (อย่างมีนัยสำคัญ) เมื่อเติม KSF ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมเหลวของไขมันผสม เป็นผลมาจากปริมาณ

กรดสเตียริกที่มีจุดหลอมเหลวสูงนั้นลดลงตามลำดับ แต่เมื่อเติมมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจะทำให้เกิดการลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้นสูงกว่า 40% (w/w) ดังจะเห็นลักษณะพีคการหลอมเหลวมีพฤติกรรมคล้ายกับการหลอมเหลวของ KSF เพราะส่วนมาก KSF จะประกอบด้วยกรดลอริก และกรดไมริสติก ปริมาณใกล้เคียงกัน แต่ CBS ทางการค้า มีกรดสเตียริกในปริมาณสูง และมีความหลากหลายของชนิดกรดไขมันมากกว่า ทำให้ความเข้ากันได้ของไขมันมีน้อย และเกิดปรากฏการณ์ยูเทคติกหรือความเข้ากันไม่ได้ของไขมันผสมจากการเติมในปริมาณที่สูงขึ้น เช่นเดียวกับการเติมไขมันแข็งจากน้ำมันเมล็ดปาล์มลงในเนยโกโก้หรือน้ำมันปาล์มจากการศึกษาของ Ribeiro *et al.* (2013) และ de Oliveira *et al.* (2015) ตามลำดับที่ส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวลดลงอย่างชัดเจน ต่างกับการเติมไขมันแข็งจากน้ำมันปาล์มหรือน้ำมันเมล็ดฝ้าย ที่มีผลต่อการเพิ่มจุดหลอมเหลวมากกว่า เนื่องจากมีชนิดกรดไขมันคล้ายกัน และปริมาณกรดไขมันที่มีสายคาร์บอนยาวจำนวนมากกว่า

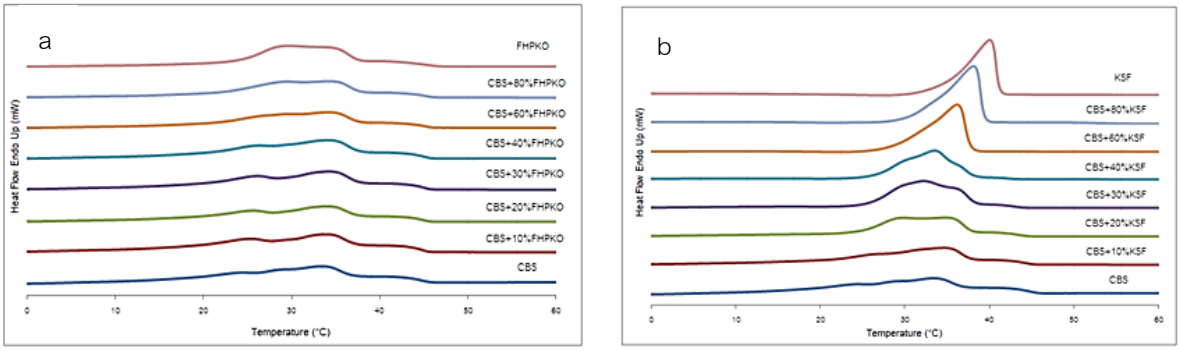


Figure 1 DSC melting thermograms of commercial CBS added FHPKO (a) or KSF (b) at different concentrations.

ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึก และความสามารถในการเข้ากันได้ของไขมันผสม

โดยปกติแล้วเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิแก่ตัวอย่าง จะทำให้เกิดการหลอมเหลวและมีปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึก (Solid fat content หรือ SFC) ลดลง แต่ค่า SFC ที่ลดลง ณ อุณหภูมิต่างๆ จนถึงที่อุณหภูมิร่างกาย (ประมาณ 37.5°C) จะแสดงถึงลักษณะการเป็นไขในปากขณะรับประทานได้ ดังแสดงใน Figure 2 ทั้ง CBS ทางการค้า และ FHPKO จะมี SFC สูงกว่า 80% ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C และจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 20-45°C แสดงว่าการเติม FHPKO ลงใน CBS ทางการค้า ไม่ได้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ SFC มากนัก แต่จะส่งผลให้ SFC เป็น 0% ที่อุณหภูมิสูงถึง 45°C ซึ่งจะทำให้เกิดลักษณะเป็นไขในปากขณะรับประทานได้ เนื่องจากอุณหภูมิในการหลอมเหลว และปริมาณของกรดไขมันอิ่มตัวของไขมันผสมเพิ่มมากขึ้น แต่จะเหมาะสมต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะการเติม FHPKO ที่ความเข้มข้น 80% (w/w) จะมีปริมาณกรดลอริก กรดไมริสติก และกรดปาล์มมิติกเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติม KSF ลงใน CBS ทางการค้า จะมี SFC ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20-37.5°C โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 60 หรือ 80% (w/w) จะทำให้ SFC เป็น 0% ที่อุณหภูมิ 37.5°C เป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณกรดสเตียริก และอุณหภูมิในการหลอมเหลว

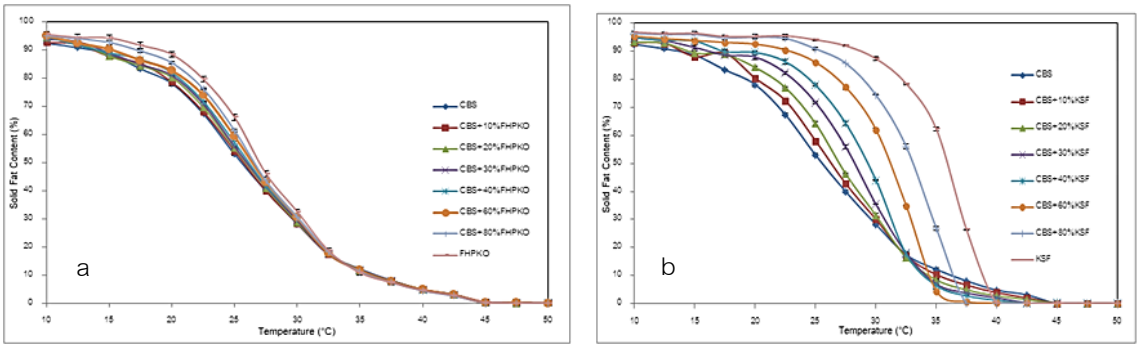


Figure 2 Solid fat content of commercial CBS added FHPKO (a) or KSF (b) at different concentrations.

ความสามารถในด้านความเข้ากันได้ของไขมัน 2 ชนิด (Figure 3) ระหว่าง CBS ทางการค้า และ FHPKO เรียกว่า ปรากฏการณ์โมโนเทคติก (Biswas *et al.*, 2016) แสดงถึงความสามารถในการเข้ากันได้ดีของไขมันผสม โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ที่ช่วงอุณหภูมิ 27.5-50°C ต่างจากการเติม KSF ลงใน CBS ทางการค้า จะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยูเทคติก คือ การลดลงของค่า SFC ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ ที่ไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแนวเส้นตรง จึงมองเห็นเป็นเส้นโค้งของ SFC ที่ลดลง อันเกิดจากความต่างกันของชนิดกรดไขมัน ดังเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 27.5-37.5°C ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 40% (w/w) อันสอดคล้องกับค่า SFC ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 37.5°C ซึ่งจะส่งผลต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์และการวางจำหน่ายได้ นั่นคือหากทำการเก็บรักษาหรือวางจำหน่ายผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิที่เกิดปรากฏการณ์ยูเทคติกที่ระดับความเข้มข้นนั้นๆ จะทำให้เกิดการหลอมเหลวของเฟสไขมัน และเกิดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ได้

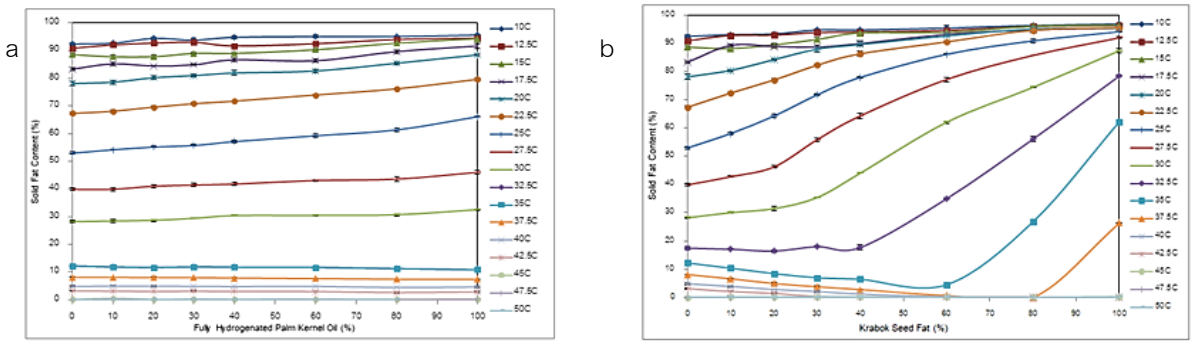


Figure 3 Compatibility of commercial CBS added FHPKO (a) or KSF (b) at different concentrations.

ลักษณะรูปร่าง จำนวน และขนาดของผลึก

รูปร่างผลึกของไขมันมีผลต่อคุณลักษณะปรากฏภายนอกของผลิตภัณฑ์ และแสดงถึงโครงสร้างของผลึกของไขมันนั้นๆ นั่นคือหากรูปผลึกมีขนาดเล็ก จำนวนมาก จะทำให้ลักษณะปรากฏมีความเรียบเนียน และผลึกจะมีโครงสร้างที่แข็งแรงได้จากการยึดเกาะกันของผลึกข้างเคียง ต่างจากการที่มีรูปผลึกขนาดใหญ่ โดยลักษณะพื้นหลังสีดำหรือสีเทา คือ น้ำมันเหลว ส่วนรูปผลึกหรือส่วนของแข็งจะแสดงออกมาในส่วนของสีขาว ซึ่งจะทำการศึกษารูปผลึกไขมันผสมที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Figure 4) รูปผลึกของ CBS ทางการค้า และ FHPKO จะมีรูปผลึกเป็นเม็ด (granular) ขนาดเล็ก จำนวนมาก ต่างกับ KSF ที่เป็นรูปทรงกลม

(spherulites) แผ่ขยายออกเป็นแฉก ที่เกิดจากการรวมกลุ่มของผลึกรูปเข็ม (needle-like) จากศูนย์กลาง ซึ่งเมื่อมีการเติม FHPKO ลงใน CBS ทางการค้า จะทำให้ไขมันผสมมีผลึกเล็กลง แต่มีการจับกลุ่มกันใหญ่ขึ้นที่ความเข้มข้น 80% (w/w) คือทำให้เกิดพื้นที่ว่างของน้ำมันเหลวมากขึ้น แต่ผลึกยังยึดเกาะเป็นโครงสร้างที่หนาแน่น ในขณะที่การเติม KSF ลงใน CBS ทางการค้า จะทำให้รูปผลึกของไขมันผสมมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลมาจากการชะลอการตกผลึกของไขมันผสม ที่จำเป็นต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อทำการคายพลังงานออกมาขณะทำการตกผลึก เมื่อมีการเติม KSF ที่ความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น

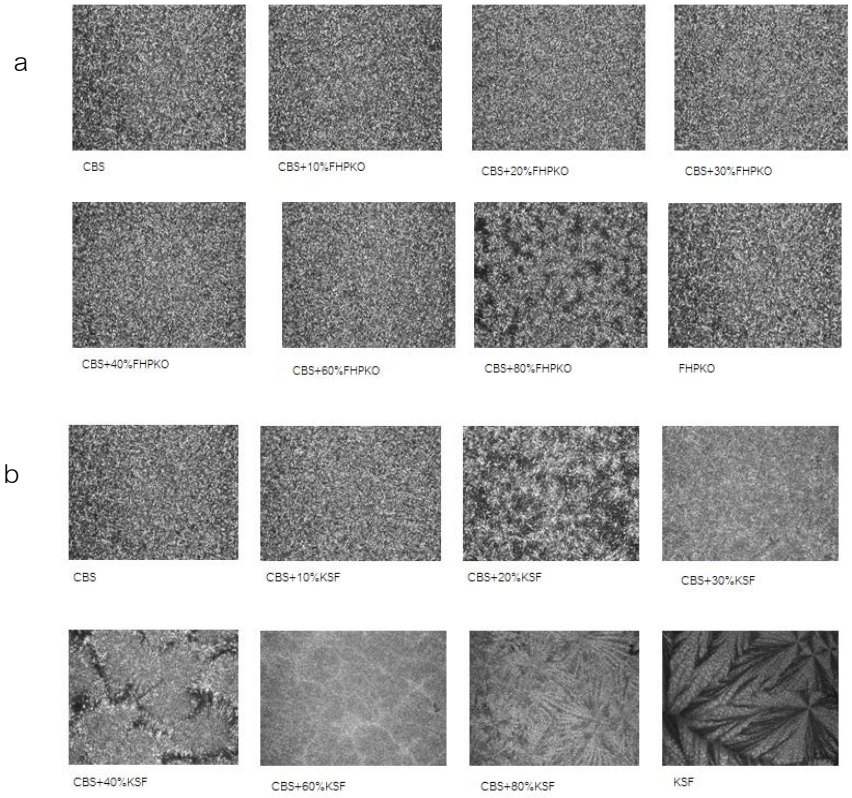


Figure 4 Crystal structure undergoing a static temperature at 30°C in 24 hours of commercial CBS added FHPKO (a) or KSF (b) at different concentrations.

สรุป

การเติม FHPKO ลงใน CBS ทางการค้า ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมเหลวมากนัก แต่จะมีส่วนเพิ่มอัตราเร็วในการตกผลึก และเพิ่มความแข็งของไขมันผสมได้ จนอาจก่อให้เกิดลักษณะความเป็นไขในปากขณะรับประทานจากการลดลงของปริมาณ SFC เป็น 0% ที่อุณหภูมิสูงถึง 45°C เนื่องจาก CBS ทางการค้า และ FHPKO มีกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก และมีจุดหลอมเหลวสูงใกล้เคียงกัน นอกจากนี้การเติม KSF ลงใน CBS ทางการค้า จะทำให้เกิดความแตกต่างขององค์ประกอบของกรดไขมัน และปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวที่ลดลง ทำให้การเติมที่ความเข้มข้นสูงกว่า 40% (w/w) เกิดปรากฏการณ์ยูเทคติกได้ ส่งผลให้เกิดการชะลอการตกผลึก และเพิ่มขนาดผลึกให้โตขึ้น จนเกิดความไม่เรียบเนียนต่อผลิตภัณฑ์ ฉะนั้นการใช้ CBS ทางการค้าร่วมกับการเติม FHPKO จะมีส่วนแก้ปัญหาการละลายของเฟสไขมันของช็อกโกแลตเคลือบเมื่อทำการเก็บรักษาในประเทศที่มีอากาศร้อนหรืออุณหภูมิสูง เช่น ประเทศไทย ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เกรทฮิลฟู้ดส์ จำกัด และโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรมระดับปริญญาโท สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ในการสนับสนุนทุนวิจัยในงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

AOCS. 1998. Official Methods and Recommended Practices of the AOCS, DSC melting of fats and oils, Method Cj 1-94; **American Oil Chemists' Society**: Champaign, IL.

Biswas, N., Y. L. Cheow, C. P. Tan and L. F. Siow. 2016. Blending of palm mid-fraction, refined bleached deodorized palm kernel oil or palm stearin for cocoa butter alternative. **Journal of American Oil Chemists' Society** 93: 1415-1427.

de Oliveira, G. M., A. P. B. Ribeiro and T. G. Kieckbusch. 2015. Hard fats improve technological properties of palm oil for applications in fat-based products. **LWT - Food Science and Technology** 63: 1155-1162.

Fiebig, H. J. and J. Luttke. 2003. Solid fat content in fats and oils – determination by pulsed nuclear magnetic resonance spectroscopy [C-IV 3g (2003)]. **European Journal of Lipid Science and Technology** 105: 377-380.

Jahurul, M. H. A., I. S. M. Zaidul, N. A. N. Norulaini, F. Sahena, S. Jinap, J. Azmir, K. M. Sharif and A. K. M. Omar. 2013. Cocoa butter fats and possibilities of substitution in food products concerning cocoa varieties, alternative sources, extraction methods, composition, and characteristics. **Journal of Food Engineering** 117: 467-476.

Ribeiro, A. P. B., R. C. Basso and T. G. Kieckbusch. 2013. Effect of the addition of hardfats on the physical properties of cocoa butter. **European Journal of Lipid Science and Technology** 115: 301-312.

Stortz, T. and A. G. Marangoni. 2011. Heat resistant chocolate. **Food Science & Technology** 22: 201-214.

Characterisation of Anaerobically Treated Molasses Wastewater from Ethanol Production Plants

Chanita Phromkeeree[1] and Nuttakan Nitayapat[1*]

ABSTRACT

Molasses wastewater (MW) is produced from molasses-based ethanol production. Typical characteristics of MW are high chemical oxygen demand (COD), high biochemical oxygen demand (BOD), low pH, extensive odor and dark brown color. MW is usually treated anaerobically and the effluent after the treatment is called, in this work, anaerobically treated molasses wastewater (AMW). It still contains the same dark brown color and therefore may not be suitable to be discharged into the environment. Changes in the characteristics of MW and AMW along the wastewater management process of a bioethanol industry were investigated. Biological, physical and chemical characteristics of MW and AMW were studied for nine months. It was found that AMW was still dark brown and had strong odour. Its pH was slightly alkaline. The concentrations of COD and BOD were 30.76-86.60 g/L and <0.30-2.34 g/L, respectively. These values in AMW which has passed through the anaerobic wastewater treatment system were 59% COD reduction and 95% BOD reduction. It was also found that AMW contained K (2802.60-9041.20 mg/L) and N (500.45-2845.81 mg/L). On the other hand, phosphorus (P) was not detected in AMW. Furthermore, AMW contained heavy metals such as barium (Ba), mercury (Hg) and selenium (Se) at the concentrations higher than the limits set by the water quality standards for industrial effluent of the Pollution Control Department (PCD), Thailand.

Key Words: molasses, wastewater, anaerobic, ethanol, fertiliser

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

[1]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

One of agricultural exportation of Thailand is sugar with 70% share of total agricultural output (Office of the National Economic and Social Development Boar, 2014) and the raw material for sugar production is sugar cane. The production of sugar generates several waste products such as bagasse, pressmud and molasses (Nguyen *et al*., 2008).

Molasses is now considered as a by-product of sugar industry. It is the final residue from sugar crystallisation. It is used as a raw material to produce several products in industry. One of those products is ethanol. The ethanol production produces molasses wastewater (MW) which is a high strength wastewater (Wang *et al*., 2014). In Guangxi province China, the production of 1 ton of molasses produces 0.2 tons of alcohol and generates 2.5 to 3 tons of MW (Shen *et al*., 2013). In Brazil, the production of 1 litres of ethanol generates 10 to 15 litres of MW (Moraes *et al*., 2015).

Typical characteristics of MW are high chemical oxygen demand (COD), high biochemical oxygen demand (BOD), low pH, extensive odor and dark brown colour. It contains color compounds such as melanoidins including phenols, melanin and caramel. It may also contains nutrients in the form of nitrogen, phosphorus and potassium (Mahimairaja and Bolan, 2004; Adikane *et al*., 2006; Satyawali and Balakrishnan, 2008; Tsioptsias *et al*., 2015).

A management process of MW is commonly based on the biological anaerobic treatment (Tsioptsias *et al*., 2015). The anaerobically treated MW (AMW) contains lower values of BOD and COD but the brown color remains (Satyawali and Balakrishnan, 2008). To date, there are few publications about the characteristics of AMW available.

An ethanol production plant which produced 230,000 litres ethanol/day generated 2,000,000 litres AMW daily. In some locations in Thailand, AMW was used commonly as a fertiliser in sugar cane plantation (private communication). This work aimed to study the characteristics of MW and AMW of the ethanol production which may be used as a fertiliser in sugar cane plantation. The results may help to explain the solution of wastewater management and lead to a sustainable utilisation of this water on agricultural fields.

MATERIALS AND METHODS

1. MW and AMW sampling

The various MW and AMW samples were collected from 5 locations at a molasses-based ethanol production factory located in Central Thailand. Samples were collected at the following locations: 1. MW collected after distillation columns (D), 2. MW from the equalisation basin (E) which stores MW before sent to the biogas lagoon, 3. AMW which was the effluent of the biogas lagoon no.1 (B1), 4. AMW which was the effluent of the biogas lagoon no.2 (B2), 5. AMW from a basin which stores AMW before distributed to sugar cane plantation (F). Samples collections were carried out

once a month for the total period of 9 months. All samples was stored at 4ºC until being analyzed except BOD measurements which were performed within 6 h after sample collections.

2. Analytical methods

BOD is determined according to the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater VS-1203P1N (Greenberg *et al.,* 1971). COD was carried out according to the American Society of Testing Material standard methods D1252-95 (Anonymous, 1995). The cations and anions analysis including P, Cr^{6+}, Cl^- was analysed according to the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Rice *et al*., 2012). $SO_4^{2-}$was analysed according to the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Clesceri *et al*., 1998). As, Cd, Se, Pb, Hg, Ni, Ba, Na^+were analysed by ICP-MS based on the Standard methods for the Examination of Water and Wastewater (Rice *et al*., 2012). Ca^+, Mg, K^+ and S were analysed by ICP-OES according to the Standard methods for the Examination of Water and Wastewater (Rice *et al*., 2012). N was analysed by kjeldahl method based on Standard methods for the Examination of Water and Wastewater (Rice *et al*., 2012).

The experiment was conducted on the basis of a Completely Randomized Design (CRD).

3. Characteristics of MW and AMW samples

Physical and chemical characteristics of MW and AMW were determined. These are colour, pH, COD, Electrical conductivity (EC) and chemical compounds such as heavy metals (As, Ba, Cd, Pb, Cr^{6+}, Se, Ni, Hg), nutrient elements (N, P, K, Mg, S, Ca^{2+}, Cl^-, Na^+, SO_4^{2-}). BOD which is a biological characteristic of MW and AMW was also determined.

RESULTS AND DISCUSSIONS

1. Physical and chemical characteristics

MW and AMW collected from all 5 locations at a molasses-based ethanol production factory were dark brown color (Figure 1). It contained colour compounds such as melanoidins, caramel and phenolics which were low biodegradability (Bilad *et al*., 2011; Santal and Singh, 2013; Shen *et al*., 2014). These compounds are form molasses used as the raw material for ethanol production (Tsioptsias *et al*., 2015)

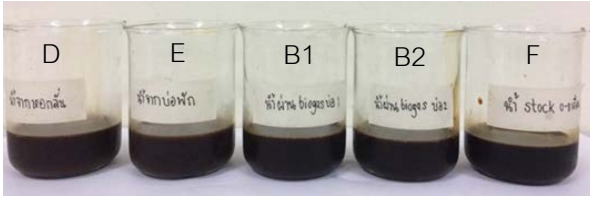


Figure 1 Colour of MW and AMW from 5 locations (D: Distillation column, E: Equalisation basin, B1:Biogas lagoon no.1, B2: Biogas lagoon no.2, F: Stored AMW basin)

The pH of MW was approximately 4.11. The low pH of MW was caused by sulfuric acid during fermentation (Bouallagui *et al.*, 2013) or acetic acid, acetone, oxalic acid and absolute alcohol (Satyawali and Balakrishnan, 2008). After MW was treated by anaerobic degradation, the pH of AMW was slightly alkaline (approximately 7.98). The pH values of all AMW collected were within the limits set by the water quality standards for industrial effluent of the Pollution Control Department (PCD) which was 5.5-9.0 (Pollution Control Department [PCD], 1996). These pHs were suitable for sugar cane growth (Hunsigi, 1993) and the utilisation of all micronutrients by soil microorganisms (Meyer, 2013).

MW collected in March to October 2016 had high electrical conductivity (EC). They were averagely at 23.46 mS/cm. The EC of AMW still had high EC (approximately 24.55 mS/cm). EC of MW and AMW are related to the dissolved salt concentrations such as K^+, Mg^+, Ca^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-} and Na^+ (Table 1). Lazarova and Bahri (2005) reported that non-saline water had EC less than 0.7 dS/m and very highly saline water had EC between 14-42 dS/m. Holden and McGuire (2014) mentioned that AMW with EC value higher than 3.2 mS/cm was not suitable for irrigation of sugar cane due to the extreme level of salt or residual alkali.

The COD of MW and AMW for nine months periods were 57.69-215.89 and 30.76-86.59 g/L, respectively (Figure 2). The concentrations of COD found in AMW were higher than the upper limits set by the water quality standards for industrial effluent of the PCD which is 120 mg/L (PCD, 1996). It indicated that AMW still had too high COD even though it was treated by an anaerobic treatment system. The anaerobic treatment system reduced approximately 59% COD. This efficiency coincides with that observed by Satyawalia and Balakrishnan (2008) that anaerobic degradation could converts over 50% COD of MW into biogas.

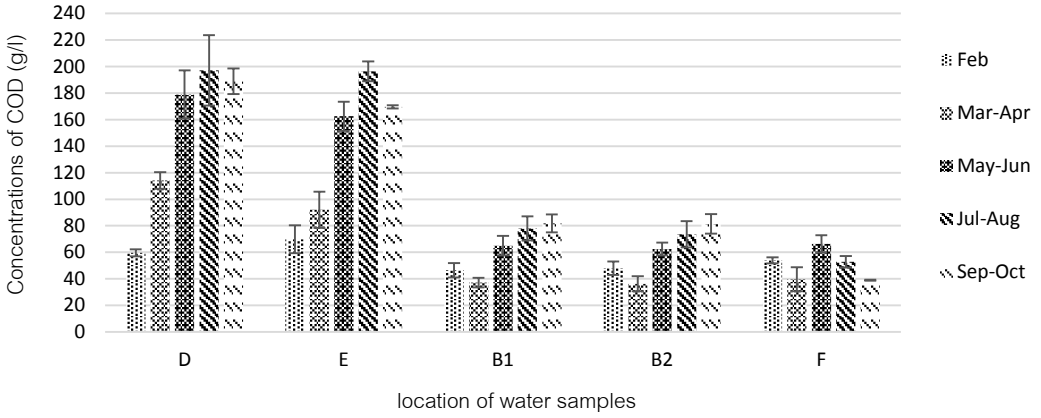


Figure 2 COD (mean±SD) of MW and AMW from 5 locations in February to October 2016 (D: Distillation column, E: Equalisation basin, B1: Biogas lagoon no.1, B2: Biogas lagoon no.2, F: Stored AMW basin)

Table 1 Characteristics of MW and AMW from 5 locations in March to October 2016 (mean±SD)

Characterisitics	D	E	B1	B2	F
pH	4.19±0.15[a]	4.03±0.12[a]	7.88±0.24[b]	7.74±0.20[b]	8.34±0.37[c]
EC (mS/cm)	23.49±2.39[ab]	23.44±0.53[ab]	25.68±1.99[bc]	25.94±1.54[c]	22.05±3.35[a]
TKN* (mg/l)	3252.15±651.13[a]	3075.35±296.35[a]	2243.06±567.182[b]	2440.53±535.48[b]	1594.73±651.94[c]
P (g/l)	nd	nd	nd	nd	nd
K (mg/l)	7341.32±3295.66[a]	6759.01±2305.14[a]	6147.01±1895.75[a]	6053.7±1832.83[a]	5946.31±2219.39[a]
As (mg/l)	0.04±0.02[a]	0.03±0.02[a]	0.07±0.12[a]	0.02±0.01[a]	0.02±0.01[a]
Ca (mg/l)	2303.13±550.70[a]	2253.82±483.51[a]	1042.64±341.63[b]	963.39±322.19[b]	920.80±778.73[b]
Na (mg/l)	347.27±101.66[a]	373.97±59.82[a]	343.31±58.12[a]	347.70±44.33[a]	398.06±99.68[a]
Cd (mg/l)	nd	nd	nd	nd	nd
SO_4^{2-} (mg/l)	7707.58±6251.51[a]	7989.9±7523.81[a]	3575.60±2414.30[a]	4002.02±2837.95[a]	4587±4851.79[a]
Cr^{6+} (mg/l)	nd	nd	nd	nd	nd
Mg (mg/l)	1471.44±396.16[a]	1479.15±349.16[a]	1237.43±439.22[a]	1265.81±409.49[a]	1169.90±432.95[a]
S (mg/l)	1675.13±312.22[a]	1407.20±454.07[a]	617.97±166.40[b]	591.33±120.64[b]	755.35±481.48[b]
Se* (mg/l)	0.05±0.03[a]	0.05±0.03[a]	0.05±0.03[a]	0.05±0.03[a]	0.04±0.03[a]
Ba* (mg/l)	1.51±0.12[a]	1.20±0.09[a]	0.78±0.04[b]	0.81±0.04[b]	1.15±0.41[ab]
Pb (mg/l)	0.012±0.009[ab]	0.058±0.055[a]	0.005±0.006[b]	0.005±0.006[b]	0.010±0.002[b]
Hg* (mg/l)	0.002±0.002[a]	0.003±0.000[a]	0.002±0.002[a]	0.003±0.000[a]	0.005±0.005[a]
Ni (mg/l)	0.43±0.31[a]	0.52±0.40[a]	0.47±0.36[a]	0.52±0.39[a]	0.37±0.25[a]

nd: not detected

* higher than the water quality standards value

following industrial effluent standards for industrial plants and industrial estates

[a-c] Different small letters indicate statistically significant differences between groups ($p \leq 0.05$)

MW and AMW contained higher K than N and P (Table 1) due to the use of molasses which contained 77 g K/L (Kuroda *et al.*, 2015) as the raw material for ethanol production. On the other hand, P was not detected in both MW and AMW. Satyawali and Balakrishnan (2008) reported that cane molasses contained only 0.08% P.

The analysis of micronutrients of MW and AMW included the secondary nutrients for crops i.e. Ca, **Mg a**nd S. Ca was a major micronutrient of MW and AMW and it was higher than Mg and S. There was about 59% reduction of Ca and 49% reduction of S after MW was anaerobically treated but the concentrations of Mg were similar in both MW and AMW (Table 1).

In table 1 Cd and Cr^{6+} were not detected in AMW. However, Ba, Hg and Se were found at the concentrations higher than the upper limits set by the water quality standards for industrial effluent of the PCD which were 1.0, 0.005 and 0.02 mg/L, respectively (PCD, 1996). These heavy metals may be introduced to AMW from feedstock and used chemical compound, corrosion of piping, tanks and heat exchangers (Wilkie *et al.*, 2000). The heavy metals found in our study may not affect sugar cane

plant due to their low concentrations and because they are not essential nutrients for sugar cane (Meyer, 2013).

2. Biological characteristic

The BOD of MW and AMW for nine months periods were 16.65-37.13 g/L and <0.30-2.34 g/L, respectively (Figure 3). The concentrations of BOD in some samples were unable to be determined. This might be caused by the extremely low concentration of biodegradable organic matter. It was found that the anaerobic treatment system reduced approximately 95% BOD. This efficiency was more than that observed by Satyawali and Balakrishnan (2008) which reported 60-90% BOD reduction. The concentrations of COD found in AMW were higher than the upper limits set by the water quality standards for industrial effluent of the PCD which is 20 mg/L (PCD, 1996).

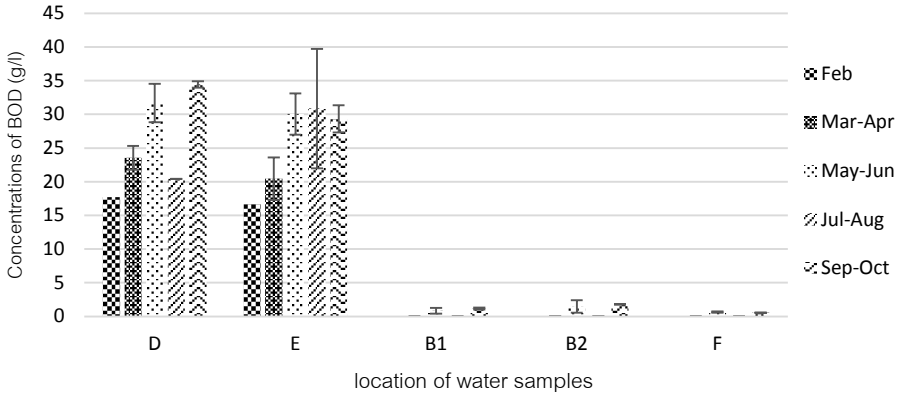


Figure 3 BOD (mean±SD) of MW and AMW from 5 locations in February to October 2016
(D: Distillation column, E: Equalisation basin, B1: Biogas lagoon no.1,
B2: Biogas lagoon no.2, F: Stored AMW basin)

CONCLUSION

AMW was dark brown and had strong odour. Its pH was slightly alkaline. The concentrations of COD and BOD in AMW which has passed through the anaerobic wastewater treatment system were 59% COD reduction and 95% BOD reduction. It was also found that AMW contained mainly K and N. On the other hand, P was not detected in AMW. Furthermore, AMW contained some heavy metals such as Ba, Hg and Se at the concentrations higher than the upper limits set by the water quality standards for industrial effluent of the PCD. This information can be used for making decision on the utilisation of AMW. Long term use of this AMW in agriculture should be monitored for its impact on the environment.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by the National Research Council of Thailand (NRCT). We also thank the ethanol production factory in central Thailand for their supports on the MW and AMW samples.

REFERENCES

Adikane, H.V., M.N. Dange and K. Selvakumari. 2006. Optimization of anaerobically digested distillery molasses spent wash decolorization using soil as inoculum in the absence of additional carbon and nitrogen source. **Bioresour. Tech.** 97(16): 2131-2135.

Anonymous. 1995. Standard test methods for chemical oxygen demand (dichromate oxygen demand) of Water. *In* Anonymous. **Annual Book of ASTM Standard**. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

Bilad, M.R., P. Declerck, A. Piasecka, L. Vanysacker, X. Yan and I.F.J. Vankelecom. 2011. Treatment of molasses wastewater in a membrane bioreactor: Influence of membrane pore size. **Separ. Purif. Tech.** 78: 105-112.

Bouallagui, H., Y. Touhami, N. Hanafi, A. Ghariani and M. Hamdi. 2013. Performances comparison between three technologies for continuous ethanol production from molasses. **Biomass Bioenerg.** 48: 25-32.

Clesceri, L.S., A.E. Greenberg and A.D. Eaton, eds. 1998. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, Washington.

Greenberg, A.E., M.J. Taras and R.D. Hoak, eds. 1971. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, Washington.

Holden, J. and P. McGuire. 2014. **Irrigation of Sugarcane Manual.** Sugar Research Australia Ltd. Australia.

Hunsigi, G. 1993. **Production of Sugarcane Theory and Practice**. Mercedesdruck, Berlin.

Kuroda, K., T. Chosei, N. Nakahara, M. Hatamoto, T. Wakabayashi, T. Kawai, N. Araki, K. Syutsubo and T. Yamaguchi. 2015. High organic loading treatment for industrial molasses wastewater and microbial community shifts corresponding to system development. **Bioresour. Tech.** 196: 225-234.

Lazarova, V. and A. Bahri. 2005. **Water Reuse for Irrigation: Agriculture, Landscapes and Turf Grass.** CRC Press. U.S.A.

Mahimairaja, S. and N.S. Bolan. 2004. Problems and prospects of agricultural use of distillery spentwash in india, pp. 1-6 *In* **Proceedings of 3rd Australian New Zealand Soils Conference**. 5 – 9 December 2004, University of Sydney, Australia.

Meyer, J. 2013. Sugarcane nutrition and fertilization. pp. 133-180. *In* Meyer, J., P. Turner, P. Rein and K. Mathias., eds. **Good Management Practices for the Cane Industry.** Bartens, Germany.

Moraes, B. S., M. Zaiat and A. Bonomi. 2015. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in brazil: Challenges and perspectives. **Renew. Sust. Energ. Rev.** 44: 888-903.

Nguyen, T. L. T., S. H. Gheewala and S. Garivait. 2008. Full chain energy analysis of fuel ethanol from cane molasses in thailand. **Appl. Energ.** 85: 722-734.

Office of the National Economic and Social Development Boar, 2014. Information about sugar cane and sugar. **Annual Rept.** 2014.

Pollution Control Department, 2016. **Industrial effluent standards for industrial plants and industrial estates.** Available Source: http://infofile.pcd.go.th/law/std_water_iww_2559.pdf?CFID=1573199&CFTOKEN=23122859. May 17, 2017.

Rice, E.W., R.B. Baird, A.D. Eaton and L.S. Clesceri, eds. 2012. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, Washington.

Santal, A. R. and N. P. Singh. 2013. Biodegradation of melanoidin from distillery effluent: role of microbes and their potential enzymes. pp. 71-104. *In* R. Chamy and F. Rosenkranz, eds. **Biodegradation of Hazardous and Special Products**. InTech Publishers, Croatia.

Satyawali, Y. and M. Balakrishnan. 2008. Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: a review. **J. Environ. Manage.** 86(3): 481-497.

Shen, P., F. Han, S. Su, J. Zhang, Z. Chen, J. Li, J. Gan, B. Feng and B. Wu. 2014. Using pig manure to promote fermentation of sugarcane molasses alcohol wastewater and its effects on microbial community structure. **Bioresour. Tech.** 155: 323-329.

Shen, P., J. Zhang, J. Zhang, C. Jiang, X. Tang, J. Li, M. Zhang and B. Wu. 2013. Changes in microbial community structure in two anaerobic systems to treat bagasse spraying wastewater with and without addition of molasses alcohol wastewater. **Bioresour. Tech.** 131: 333-340.

Tsioptsias, C., D. Petridis, N. Athanasakis, I. Lemonidis, A. Deligiannis and P. Samaras. 2015. Post-treatment of molasses wastewater by electrocoagulation and process optimization through response surface analysis. **J. Environ. Manage.** 164: 104-113.

Wang, Y., W. Q. Guo, D. F. Xing, J. S. Chang and N. Q. Ren. 2014. Hydrogen production using biocathode single-chamber microbial electrolysis cells fed by molasses wastewater at low temperature. **Int. J. Hydrogen Energ.** 39: 19369-19375.

Wilkie, A. C., K. J. Riedesel and J. M. Owens. 2000. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass Bioenerg.** 19: 63-102.

ผลของช่องระบายอากาศต่อความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกขนาดมิติฐานมาตรฐาน

Effect of Vent Design on Box Compression Strength of Corrugated Common Footprint

รชยา ธชเสถียร[1] และ เลอพงศ์ จารุพันธ์[1*]

Rachaya Dhachasathien[1] and Lerpong Jarupan[1*]

บทคัดย่อ

กล่องกระดาษลูกฟูกที่มีช่องระบายอากาศเป็นบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้ในการขนส่งผลิตผลทางการเกษตร ช่องระบายอากาศจะช่วยระบายความร้อนที่เกิดจากกระบวนการหายใจและการคายน้ำของผลิตผล แต่จะส่งผลต่อความแข็งแรงของกล่องกระดาษลูกฟูกได้เช่นกัน การใช้กล่องขนาดมิติฐานมาตรฐานสำหรับการขนส่งสินค้ามีผลให้การจัดวางเรียงสินค้าแบบรวมหน่วยบนแท่นรองรับสินค้าและใช้พื้นที่ในตู้คอนเทนเนอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของช่องหรือรูระบายอากาศต่อค่าความต้านทานแรงกดของกล่องขนาดมิติฐานมาตรฐาน โดยออกแบบช่องระบายอากาศให้มีสัดส่วนพื้นที่และตำแหน่งที่แตกต่างกันบนผนังกล่องกระดาษลูกฟูกแบบ Half size ลอน BC จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดของกล่องพบว่าช่องระบายอากาศที่มีสัดส่วนรวมของพื้นที่ร้อยละ 3 และอยู่ตรงตำแหน่งกลางของผนังกล่องมีค่าความต้านทานแรงกดของกล่องสูงสุด และช่องระบายอากาศที่มีสัดส่วนรวมของพื้นที่ร้อยละ 7 ที่อยู่ตำแหน่งด้านล่างของผนังกล่องมีค่าความต้านทานแรงกดน้อยสุด เมื่อเปรียบเทียบกับกล่องมิติฐานมาตรฐานที่ไม่มีช่องระบายอากาศจะมีความต้านทานแรงกดของกล่อง ดังนั้นกล่องที่มีสัดส่วนพื้นที่ของช่องระบายอากาศเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดของกล่องลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนช่องระบายอากาศที่ตำแหน่งบนและล่างของผนังกล่องไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ABSTRACT

Ventilated corrugated container is commonly used for transporting horticultural products in order to alleviate the heat generated from the respiration and transpiration process of fresh produce and also to circulate air within the container. However, the vent (hole) may result in the strength reduction of the corrugated box. Presently, the corrugated common footprint has gained attentions for usage to transport goods due to cube utilization on pallets and shipping containers. This research study is aimed to investigate on the effect of vent design on box compression strength (BCT) of the half-sized corrugated common footprint. The design involves proportional area and position of the vent on container walls. The results showed that the BCT of 3% vent area at central position on the wall was highest (3353.0±98.8 N) whist the lowest BCT yielded by 7% vent area at the bottom location on the container wall (2108.2±68.3 N). The comparative BCT of corrugated common footprint without the vent (control) was 3869.7±46.6 N. As the results, it can be concluded that increasing the vent area percentage significantly reduced the BCT of the corrugated common footprint at 0.05 confidence level. However, the vent positions at the top and bottom on the container walls insignificantly affected to the BCT of the container.

Key Words: vent design, box compression strength, corrugated containers, common footprint

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

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Packaging & Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การขนส่งผลิตผลทางการเกษตร (Horticultural product) นิยมใช้บรรจุภัณฑ์ระบายอากาศ (Ventilated packaging) ที่มีช่องหรือรูระบายอากาศ (Vent) เพื่อช่วยระบายความร้อนที่เกิดจากกระบวนการการหายใจ (Respiration) และการคายน้ำ (Transpiration) ของผลิตผลทางการเกษตร นอกจากนี้ยังช่วยในการลดอุณหภูมิของผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวภายในบรรจุภัณฑ์อีกด้วย (Delele *et al*., 2013) ทั้งนี้บรรจุภัณฑ์ระบายอากาศมีหลากหลายประเภท เช่น กล่องกระดาษลูกฟูก ตะกร้าพลาสติก ถุงพลาสติก และกล่องโฟม แต่สำหรับการขนส่งในปัจจุบันมักพบบรรจุภัณฑ์ประเภทกล่องกระดาษลูกฟูกเนื่องจากเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบา และลดความเสียหายทางกลตลอดช่องทางระหว่างกระบวนการขนส่ง นอกจากนี้ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถออกแบบการพิมพ์ลวดลายที่ตัวกล่องได้อย่างสวยงาม แต่การออกแบบกล่องให้มีช่องระบายอากาศนั้นจะเป็นการลดความแข็งแรงของตัวกล่องกระดาษลูกฟูกลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานแรงกดในแนวดิ่ง (Compression strength) ปัจจัยการออกแบบช่องระบายอากาศที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ เช่น ขนาดของช่อง จำนวนช่อง ตำแหน่งที่เจาะ และรูปร่างของช่องระบายอากาศ เป็นต้น (Jinkarn *et al*.,2006; Singh *et al*,2008; Delele *et al*., 2013) ทั้งนี้ Pathare and Opara (2014) ได้แนะนำการออกแบบช่องระบายอากาศให้มีขนาดน้อยกว่าร้อยละ 5 ของพื้นที่ผิวกล่อง และช่องระบายอากาศไม่ควรอยู่ในตำแหน่งมุมหรือขอบของกล่องเพื่อให้บรรจุภัณฑ์ยังสามารถปกป้องผลิตผลได้ นอกจากนี้ความแข็งแรงของกล่องยังขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษ ความสูง จำนวนทับรอบ (Creasing line) และอุณหภูมิและความชื้นขณะการขนส่งและเก็บรักษา (Pathare *et al*., 2016; Csavajda *et al*., 2017) ในการคำนวณค่าความต้านทานแรงกดในแนวดิ่งของกล่องสามารถคำนวณได้จากสมการ McKee ที่ใช้ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (Edge crush test) ของกระดาษลูกฟูก ความยาวเส้นรอบรูปของฐานกล่อง และความหนาของกระดาษลูกฟูกดังสมการ

$$\text{McKee BCT} = 5.87\text{ECT}(\text{Pt})^{1/2}$$

ECT = ความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (Edge crush test) (kN/m)

P = ความยาวเส้นรอบรูปของฐานกล่อง (m)

t = ความหนาของกระดาษลูกฟูก (m)

ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ขนาดมิติฐานมาตรฐาน (Common footprint) เริ่มได้รับความนิยมเพื่อใช้สำหรับการขนส่งสินค้า โดยทั่วไปบรรจุภัณฑ์ที่มีขนาดมิติฐานภายนอกของกล่องครึ่งใบ (Half size) เท่ากับ 300×400 มิลลิเมตร และกล่องเต็มใบ (Full size) เท่ากับ 400×600 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นมิติที่สามารถจัดเรียงบนแท่นวางสินค้าได้พอดี ส่วนความสูงของกล่องนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ กล่องมิติฐานมาตรฐานมีข้อดีในการใช้พื้นที่ขนส่งอย่างมีประสิทธิภาพ เพิ่มปริมาณการขนส่งในแต่ละครั้ง ช่วยลดต้นทุนในการขนส่ง และสามารถจัดเรียงสินค้าต่างชนิดกันบนแท่นวางสินค้าเดียวกันได้ (Singh *et al*., 2014; FEFCO, 2015)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของช่องระบายอากาศต่อค่าแรงต้านแรงกดของกล่องมิติฐานมาตรฐาน (Box compression test, BCT) โดยศึกษาค่าแรงต้านการกดของกล่องมิติฐานมาตรฐานลอน BC ขนาดความสูง

192 มิลลิเมตรซึ่งเป็นขนาด Half size โดยออกแบบให้สัดส่วนของพื้นที่รวมของช่องระบายอากาศเป็นร้อยละ 3, 5 และ 7 ของพื้นที่ผนังกล่องด้านยาว และอยู่ที่ตำแหน่งด้านบน กลาง และด้านล่างของผนังกล่องทั้ง 2 ด้าน

อุปกรณ์และวิธีการ

กล่องกระดาษลูกฟูกแบบฝาชน (Regular slotted container; RSC) ขนาด Half size มีมิติภายใน (Inner dimension) เท่ากับ 282×382×192 มิลลิเมตร (กว้าว×ยาว×สูง) โดยผิวกล่องด้านนอกเป็นกระดาษคราฟท์ (KA) มีน้ำหนักมาตรฐาน 125 g/m^2 ลอนเป็นกระดาษเทา (CA) ลอน BC มีน้ำหนักมาตรฐาน 110 g/m^2 และผิวกล่องด้านในเป็นกระดาษคราฟท์ (KT) มีน้ำหนักมาตรฐาน 125 g/m^2 ทำการเจาะช่องระบายอากาศที่ผนังด้านยาวทั้ง 2 ด้านของผนังกล่อง (Figure 1 ผนังกล่องหมายเลย 5 และ 6) โดยมีสัดส่วนรวมของพื้นที่ช่องระบายอากาศแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 3, 5 และ 7 ของผนังกล่องแต่ละด้าน จัดเรียงตำแหน่งช่องระบายอากาศให้เป็นระนาบตามแนวนอนของด้านยาวของผนังกล่องที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งบน กลาง และล่างของผนังกล่อง โดยแต่ละช่องระบายอากาศที่เจาะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรเท่ากันทุกตัวอย่าง ซึ่งเป็นขนาดที่พบได้ทั่วไปบนกล่องกระดาษลูกฟูกที่มีช่องระบายอากาศ (Figure 1) ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสัดส่วนรวมของพื้นที่ช่องระบายอากาศและตำแหน่งของช่องระบายอากาศที่มีขนาดเท่ากัน ดังนั้นสัดส่วนรวมของพื้นที่ช่องระบายอากาศจะเปลี่ยนไปตามจำนวนของช่องระบายอากาศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งไม่ได้ทำการทดสอบผลของช่องระบายอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น และก่อนการทดสอบได้ปรับสภาวะของกล่องตัวอย่างทั้งหมดภายใต้สภาวะบรรยากาศมาตรฐานอ้างอิง ASTM D-4332 (2006) ที่ 23±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50±2

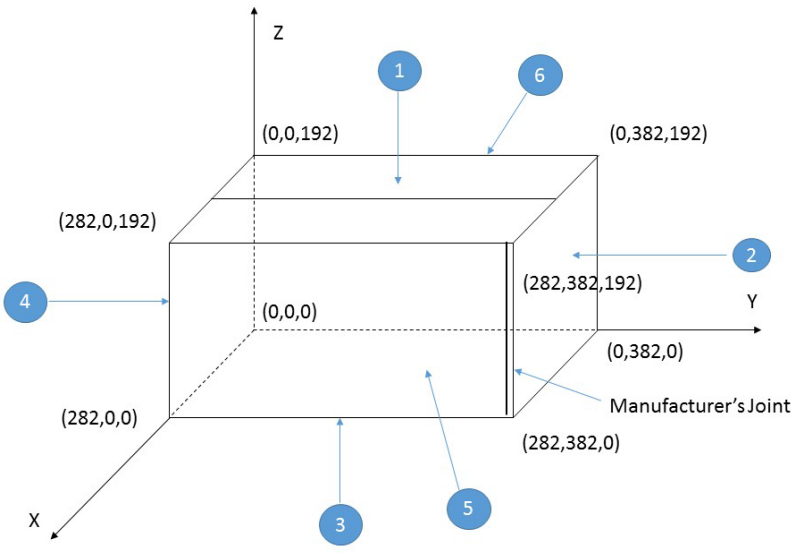


Figure 1 Dimensional coordinates of corrugated common footprint

Table 1 Experimental design for vents with different numbers and positions of the vent

Vent diameter (mm)	Total relative vent area to the container wall (%)	Number of vents	Position of the vent	Coordinates in x-y-z axes of vents
25	3	5	Top	(282,38.2,160), (282,114.6,160), (282,191,160), (282,265.6,160) and (282,340.2,160)
			Center	(282,38.2,96), (282,114.6,96), (282,191,96), (282,265.6,96) and (282,340.2,96)
			Bottom	(282,38.2,32), (282,114.6,32), (282,191,32), (282,265.6,32) and (282,340.2,32)
25	3	7	Top	(282,27.3,160), (282,81.9,160), (282,136.4,160), (282,191,160), (282,245.6,160), (282,300.1,160) and (282,354.7,160)
			Center	(282,27.3,96), (282,81.9,96), (282,136.4,96), (282,191,96), (282,245.6,96), (282,300.1,96) and (282,354.7,96)
			Bottom	(282,27.3,32), (282,81.9,32), (282,136.4,32), (282,191,32), (282,245.6,32), (282,300.1,32) and (282,354.7,32)

Vent diameter (mm)	Total relative vent area to the container wall (%)	Number of vents	Position of the vent	Coordinates in x-y-z axes of vents
25	7	11	Top	(282,17.4,160), (282,52.1,160), (282,86.8,160), (282,121.6,160), (282,156.3,160), (282,191,160), (282,225.8,160), (282,260.5,160), (282,295.2,160), (282,329.9,160) and (282,364.7,160)
			Center	(282,17.4,96), (282,52.1,96), (282,86.8,96), (282,121.6,96), (282,156.3,96), (282,191,96), (282,225.8,96), (282,260.5,96), (282,295.2,96), (282,329.9,96) and (282,364.7,96)
			Bottom	(282,17.4,32), (282,52.1,32), (282,86.8,32), (282,121.6,32), (282,156.3,32), (282,191,32), (282,225.8,32), (282,260.5,32), (282,295.2,32), (282,329.9,32) and (282,364.7,32)

ความต้านทานแรงกดของกล่อง (Box compression test; BCT) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงต้านการกดของกล่อง (Box compression tester) รุ่น PN-MTS.02 Box Compression Tester อ้างอิงจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM D-642 (2015) โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely randomized design, CRD) นำกล่องตัวอย่างที่ได้จากการปรับสภาวะภายใต้สภาวะบรรยากาศมาตรฐานแล้วมาทำการปิดผนึกด้วยกาวร้อนและเทปกาว หลังการทดสอบความต้านทานการกดของกล่องทำการบันทึกค่าแรงต้านทานการกดของกล่องที่ก่อให้เกิดความเสียหายของตัวอย่างทดสอบ ทำการทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพื้นที่ช่องระบายอากาศและตำแหน่งของช่องระบายอากาศต่อค่าความต้านทานแรงกดของกล่องที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองค่าความต้านทานแรงกดของกล่อง (BCT) ของกล่องกระดาษลูกฟูก RSC ซึ่งมีมิติฐานมาตรฐานภายในขนาด 282×382×192 มิลลิเมตร KA125/CA110/CA110/CA110/KT125 ลอน BC ที่วัดได้จากเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดของกล่อง พบว่าหลังจากเกิดความเสียหาย ณ จุดยุบตัว (Deformation) แล้ว ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณมุมกล่องและระยะห่างระหว่างช่องระบายอากาศ

จากผลการทดสอบดังแสดงใน Table 2 พบว่า กล่องที่มีช่องระบายอากาศที่มีสัดส่วนรวมของพื้นที่เท่ากับร้อยละ 3 ที่ตำแหน่งกลางของผนังกล่องมีค่าความต้านทานแรงกดของกล่องมากที่สุด เท่ากับ 3353.0±98.8 N ส่วนกล่องที่มีสัดส่วนรวมของพื้นที่ของช่องระบายอากาศร้อยละ 7 ที่ตำแหน่งล่างของผนังกล่องจะมีค่าความต้านทานแรงกดน้อยที่สุดเท่ากับ 2108.2±68.3 N ซึ่งกล่องที่มีช่องระบายอากาศจะมีค่าความต้านทานแรงกดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกล่องที่ไม่มีช่องระบายอากาศที่มีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 3869.7±46.6 N จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่า สัดส่วนพื้นที่ช่องระบายอากาศมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดของกล่องอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นเมื่อช่องระบายอากาศมีปริมาณพื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานแรงกดของกล่องลดลง

Table 2 Positions and areas of vents corresponding BCTs of RSC-corrugated common footprint

Position of vent	BCT (N)		
	Total relative vent area to container wall (%)		
	3	5	7
Top	2491.2±51.2^{ad} (9.4±1.2)	2378.5±38.4^{bd} (8.7±0.8)	2204.3±69.3^{ce} (6.8±1.1)
Center	3353.0±98.8^{ae} (7.8±1.4)	2816.5±45.7^{be} (7.6±0.8)	2121.1±54.2^{cd} (7.3±1.3)
Bottom	2491.2±142.6^{ad} (8.6±1.6)	2419.6±50.1^{ad} (9.4±0.7)	2108.2±68.3^{bd} (8.7±1.9)

^{a,b,c} Different letters in the same row represents statistical significance at 0.95 confidence interval

^{d,e} Different letters in the same column represents statistical significance at 0.95 confidence interval

( ) Indicates deformation (mm)

ส่วนการศึกษาผลของตำแหน่งช่องระบายอากาศของกล่องมิติฐานมาตรฐานทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งบน กลาง และล่างของผนังกล่อง จะได้ค่าความต้านทานแรงกดของกล่องสูงสุดและต่ำสุด โดยช่องระบายอากาศที่ตำแหน่งกลางจะมีค่าต้านทานแรงกดมากกว่าที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างของกล่อง เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าช่องระบายอากาศที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jinkarn *et al.* (2006) ที่กล่าวว่าช่องระบายอากาศที่ตำแหน่งกลางกล่องจะทำให้ความแข็งแรงของกล่องลดลงน้อยกว่าที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่าง และช่องระบายอากาศที่มีสัดส่วนพื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงของกล่องลดลง นั่นหมายถึงหากเพิ่มจำนวนช่องระบายอากาศขึ้น จะส่งผลให้ความแข็งแรงของกล่องลดลง

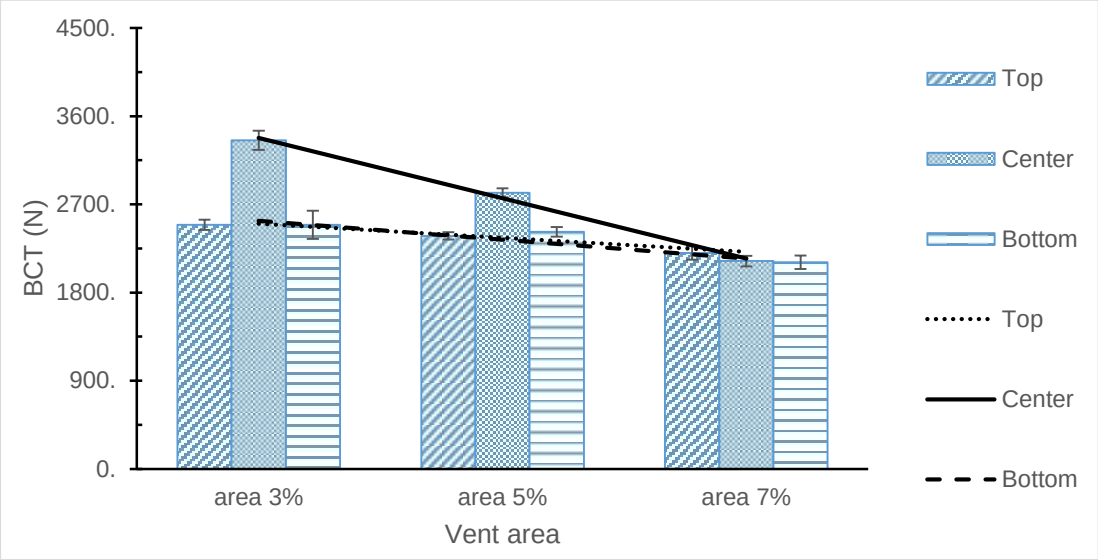


Figure 2 Effect of positions and areas of vents to BCTs of RSC-corrugated common footprint

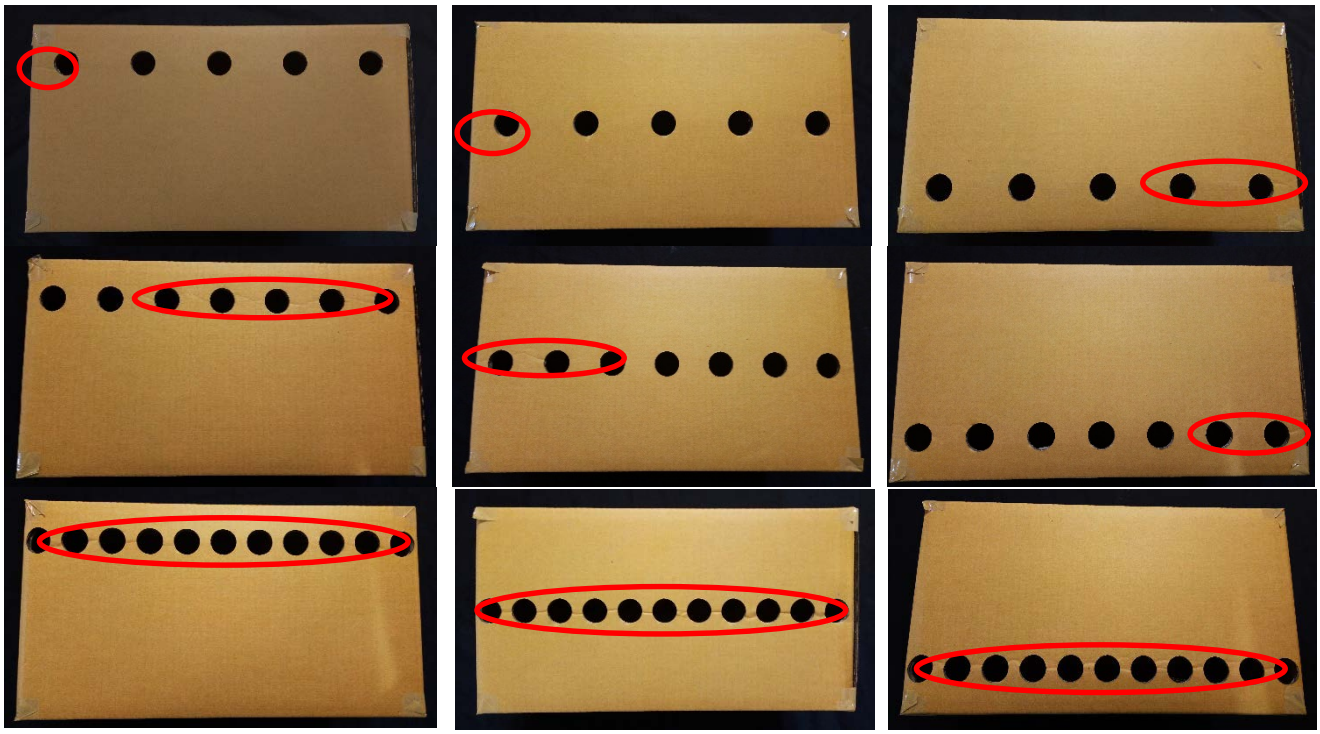


Figure 3 Deformation characteristics and appearance

นอกจากนี้หลังการทดสอบความต้านทานแรงกดของกล่องพบว่ากล่องมีรูปแบบความเสียหาย ดังแสดงใน Figure 3 กล่าวคือกล่องที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องระบายอากาศร้อยละ 3 และ 5 จะเกิดการยุบตัวบริเวณขอบกล่อง (Figure 1 ขอบระหว่างด้านกว้าง 2 และด้านยาว 5, ขอบระหว่างด้านกว้าง 2 และ ด้านยาว 6 , ขอบระหว่างด้านกว้าง 4 และด้านยาว 5 และ ขอบระหว่างด้านกว้าง 4 และด้านยาว 6) ถึงช่องระบายอากาศช่องแรกหรือช่องสุดท้าย ส่วนกล่องที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องระบายอากาศร้อยละ 7 ของผนังกล่อง จะเกิดการบุบตัวบริเวณระยะห่างระหว่างช่องระบายอากาศแต่ละช่อง

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดของกล่องจากสมการ McKee กับค่าที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดของกล่อง ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (ECT) เท่ากับ 5.37 kN/m ความยาวเส้นรอบรูปของฐานกล่อง เท่ากับ 1.39 m และกระดาษลูกฟูกลอน BC มีความหนา 0.0057m โดยกล่องที่มีช่องระบายอากาศจะมีความแข็งแรงลดลง 1/12 ของค่าความต้านทานแรงกดที่คำนวณจากสมการต่อหนึ่งด้าน จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าความต้านทานแรงกดจากสมการ McKee ของกล่องที่มีสัดส่วนของพื้นที่รวมของช่องระบายอากาศร้อยละ 3 และ 5 จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดของกล่องที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 1.9 ถึง 43.7 ของค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบ ส่วนกล่องที่สัดส่วนของพื้นที่รวมของช่องระบายอากาศร้อยละ 7 ค่าความต้านทานแรงกดของกล่องจากสมการจะมีค่ามากกว่า และมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 5.5 ถึง 9.7 ของค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบ เนื่องจากค่าที่ได้จากสมการ McKee จะขึ้นอยู่กับความหนาของกระดาษลูกฟูก และความยาวเส้นรอบรูปของฐานกล่อง แต่ไม่ได้ขึ้นกับสัดส่วนรวมของพื้นที่ช่องระบายอากาศ นอกจากนี้ค่าความความแข็งแรงของกล่องยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ชนิดของกระดาษ ความสูงของกล่อง และจำนวนทับรอย เป็นต้น

Table 3 Comparison of BCT from experiment with BCT from McKee formula

Total relative vent area to container wall (%)	BCT test (N)	BCT McKee (N)	Error (%)
Control	3869.7	2800.3	38.9
3	2491.2-3353.0		6.8-43.7
5	2378.5-2816.5	2333.6	1.9-20.7
7	2204.3-2108.2		5.5-9.7

สรุป

กล่องมิติฐานมาตรฐาน (Corrugated common footprint) เมื่อนำมาเจาะช่องระบายอากาศจะทำให้กล่องมีความต้านทานแรงกดของกล่องลดลง พื้นที่ช่องระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกดของกล่องลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ช่องระบายอากาศที่อยู่ตำแหน่งกลางกล่องจะให้

ค่าความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกมากกว่ากล่องที่มีช่องระบายอากาศอยู่ในตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างของกล่อง ช่องระบายอากาศที่ตำแหน่งบนและล่างไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งหากเปลี่ยนขนาดของช่องระบายอากาศให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น หรือเปลี่ยนตำแหน่งการจัดเรียงช่องระบายอากาศอาจส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกดของกล่องที่แตกต่างจากงานวิจัยนี้ ส่วนในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่มีความสูงแตกต่างกันอาจส่งผลต่อความแข็งแรงของกล่องด้วยซึ่งจะทำการศึกษาในโอกาสต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตรที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ASTM. 2006. **Standard Practice for Conditioning Containers, Packages, or Packaging Components for Testing**. ASTM D4332-01.

ASTM. 2015. **Standard Test Method for Determining Compressive Resistance of Shipping Containers, Components, and Unit Loads**. ASTM D642-15.

Csavajda, P., P. Böröcz, Á. Mojzes and B. Molnár. 2017. The Effect of Creasing Lines on the Compression Strength of Adjustable Height Corrugated Boxes. **Journal of Applied Packaging Research** 9: 15-22.

Delele, M. D., M. E. K. Ngcobo, S. T. Getahum, L. Chen, J. Mellmann and U. L. Opara. 2013. Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model. Part I: Model development and validation. **Postharvest Biology and Technology** 86: 536-545.

FEFCO Corrugated Packaging. 2015. **Common Footprint Standard**. Available Source: http://www.fefco.org/technical-documents/common-footprint-standard, July 2, 2015.

Jinkarn, T., P. Boonchu and S. Bao-Ban. 2006. Effect of Carrying Slots on the Compressive Strength of Corrugated Board Panels. **Natural Science** 40: 154-161.

Pathare, P. B. and U. L. Opara. 2014. Structural design of corrugated boxes for horticultural produce: A review. **Biosystems Engineering** 125: 128-140.

Pathare, P. B., T. M. Berry and U. L. Opara. 2016. Changes in moisture content and compression strength during storage of ventilated corrugated packaging used for handling apples. **Packaging Research** 1: 1-6.

Singh, J., E. Olsen, S. P. Singh, J. Manley and F. Wallace. 2008. The Effect of Ventilation and Hand Holes on Loss of Compression Strength in Corrugated Boxes. **Journal of Applied Packaging Research** 2 (4): 227-238.

Singh, S. P., V. Chonhenchob, K. Saha and J. Singh. 2014. Development of New Standardized Package System Interfacing with GMP Pallet for Imported Mangos to United States. **Journal of Applied Packaging Research** 6 (2): 11-28.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

Subject: Agro-Industry

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

ผลการทดแทนเกลือด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์และไกลซีนต่อคุณภาพของข้าวเกรียบซูริมิ

Effect of Salt Substitution with Potassium Chloride and Glycine on Quality of Surimi Cracker

ศรันยา บุญมาเลิศ[1] และ เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล[1*]

Saranya Boonmalert[1] and Saowanee Lertworasirikul[1*]

บทคัดย่อ

ในประเทศไทย ปัญหาหลักของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบในท้องตลาดคือมีปริมาณโซเดียมสูงกว่าค่า Thai RDI ของผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูงต้องบริโภคโซเดียม (≤1500 mg/วัน) ส่งผลให้ผู้ป่วยเลือกรับประทานผลิตภัณฑ์อาหารที่มีโซเดียมน้อยลงในแต่ละวัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาลดเกลือ ให้เป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูงในการรับประทานข้าวเกรียบ โดยศึกษาสูตรข้าวเกรียบที่มีโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ปริมาณแตกต่างกันร้อยละ 1, 1.5 และ 2 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่า สูตรที่มี NaCl ร้อยละ 1.5 ได้คะแนนมากที่สุดซึ่งถูกเรียกว่า สูตร Control นำสูตร Control มาศึกษาการทดแทนเกลือด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ร้อยละ 1.5 (T2) และ KCl ร้อยละ 0.75 + ไกลซีนร้อยละ 0.75 (T3) เปรียบเทียบกับสูตร Control พบว่าสูตรที่เหมาะสมที่สุดคือ สูตร T3 มีคะแนนการยอมรับจากผู้บริโภคไม่แตกต่างกับสูตร Control อยู่ที่ชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ลดลงจากสูตร Control ร้อยละ 34 มีค่าสี L*, a*,b* อยู่ที่ 58.22, 11.50 และ 30.60 ตามลำดับ ด้านเนื้อสัมผัสมีค่า Hardness, Work, Maximum force และ Distance อยู่ที่ 9.65 N, 0.43 kgf.mm., 10.83 N และ 0.46 mm. ตามลำดับ ซึ่งมีคุณภาพด้านสีและเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P>0.05) กับสูตร Control ดังนั้นข้าวเกรียบซูริมิที่ลดปริมาณ NaCl ด้วย KCl + ไกลซีน มีคุณภาพไม่แตกต่างกับสูตร Control และได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคมากที่สุด

ABSTRACT

In Thailand, the main problem of crackers in the market is higher sodium content than the requirement of Thai RDI of blood pressure patients (≤1500 mg. /day). As a result, patients choose to consume reduced-sodium food products each day. The objective of this research was to develop a reduced-salt surimi cracker. It is an alternative product for blood pressure patients to consume crackers. This research studied cracker formula with sodium chloride (NaCl) at 1, 1.5 and 2%. Sensory evaluation score of the cracker formula with 1.5% NaCl got the highest score. This formula was used as a control to study NaCl substitution with 1.5% potassium chloride (KCl) (T2) and 0.75% KCl + 0.75% glycine. The best formulation was the T3 formula with the consumer acceptance score not significantly different from the control formula. Sodium chloride content was decreased by 34%. L*, a*, b* of the product were 58.22, 11.50 and 30.60, respectively. The hardness, work, maximum force and distance were 9.65 N, 0.43 kgf.mm., 10.83 N and 0.46 mm, respectively. The color and texture were not significantly different (P>0.05) from the control formula. Therefore, the reduced NaCl surimi cracker by substituting with KCl + glycine had the quality not different from the control formula and was accepted by consumers.

Key Words: surimi, cracker, sodium chloride substitute, potassium chloride, glycine

*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

ปัจจุบันสภาพแวดล้อมทางสังคมไทยที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้คนไทยมีพฤติกรรมการบริโภคอาหารสำเร็จรูปมากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอาหารที่มีพลังงาน ไขมัน น้ำตาล และโซเดียมสูง การบริโภคผักและผลไม้ที่น้อยเกินไป รวมไปถึงการไม่ออกกำลังกาย เป็นปัจจัยเสี่ยงสำคัญที่ก่อให้เกิดโรคอ้วนและโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 373 พ.ศ. 2559 ให้ระบุฉลากหวานมันเค็มหรือ Guideline daily amount บนฉลากด้านหน้าของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งเป็นฉลากที่แสดงค่าพลังงาน น้ำตาล ไขมัน และโซเดียม ต่อหนึ่งหน่วยบรรจุภัณฑ์ เพื่อให้ผู้บริโภคสามารถใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกซื้อได้อย่างเหมาะสม และเป็นสื่อหนึ่งที่ช่วยทำให้คนไทยตระหนักถึงการเลือกบริโภคอาหารที่หวาน มัน เค็ม ลดลง เพื่อลดความเสี่ยงของการเป็นโรคอ้วนและโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2560) ซึ่งปัจจุบันพบได้ในผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปพร้อมบริโภคทันทีบางชนิด ได้แก่ มันฝรั่งทอดกรอบ ข้าวเกรียบ และข้าวโพดคั่ว เป็นต้น

ข้าวเกรียบ (Cracker) เป็นขนมขบเคี้ยวที่นิยมบริโภคกันมานานจนถึงปัจจุบัน แต่ปัญหาของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่พบมากคือ มีปริมาณโซเดียมสูงถึง 210 mg/30 g. เมื่อเทียบกับค่า RDI ของผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูงต้องบริโภคโซเดียมไม่เกิน 1500 mg/วัน และมีโซเดียมร้อยละ 40 จากโซเดียมคลอไรด์ทั้งหมด (วันทนีย์, 2555) ดังนั้นบอกได้ว่าผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบตามท้องตลาดมีโซเดียมคลอไรด์ 525 mg/30 g. ซึ่งหากผู้บริโภคได้รับโซเดียมในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้ระดับความดันโลหิตในร่างกายสูงขึ้น (สำนักโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2554) เมื่อพิจารณาปริมาณการบริโภคเกลือโซเดียมของคนไทยในปี พ.ศ. 2552-2553 พบว่าบริโภคเกลือโซเดียมถึง 10.8 กรัมต่อวันต่อคน หรือเท่ากับ 2 ช้อนชาต่อวัน (สำนักโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2554) ปริมาณการบริโภคเกลือโซเดียมดังกล่าวนั้นสูงเมื่อเทียบกับปริมาณเกลือโซเดียมที่แนะนำให้บริโภคในแต่ละวัน โดยปริมาณเกลือสูงสุดที่องค์การอนามัยโลกแนะนำให้รับประทานคือไม่เกิน 5.6 กรัมต่อวัน หรือเพียง 1 ช้อนชาต่อวัน คิดเป็นปริมาณโซเดียมประมาณ 2,300 มิลลิกรัม (สำนักโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2554; World Health Organization and Food Standards Agency, 2010; World Hypertension League, 2010) ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 182 พ.ศ. 2541 ระบุว่าผลิตภัณฑ์ที่จะกล่าวอ้างได้ว่ามีการลดสารอาหารนั้น จะต้องลดปริมาณสารอาหารนั้นได้อย่างน้อยร้อยละ 25 จากสูตรเดิม และจากงานวิจัยพบว่า สารให้รสเค็มที่นิยมนำมาใช้แทนเกลือโซเดียม คือเกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride, KCl) เนื่องจากลักษณะทางด้านเคมีของเกลือทั้งสองชนิดมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ไม่มีสีและไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ขุ่น นอกจากนั้นยังมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน แต่การใช้เกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ปริมาณมากจะทำให้เกิดรสขมหลังจากการบริโภค (Gerhard, 2006) และกรดอะมิโนไกลซีนสามารถทดแทนเกลือและช่วยบดบังรสขมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ (Ogawa et al., 2004; Waimaleongora-Ek, 2006; Kilcast and Angus, 2007)

ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่สามารถลดปริมาณการใช้เกลือโซเดียมลงโดยการใช้เกลือโพแทสเซียมคลอไรด์และไกลซีนในการทดแทน จึงนับว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีช่องทางจำหน่ายสำหรับผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูงที่เพิ่มมากขึ้นและผู้ที่ใส่ใจในสุขภาพทั่วไป นอกจากนั้นเป็นการช่วยลดภาระของรัฐบาลในการดูแลผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูงที่อาจจะเพิ่มขึ้น ให้มีปริมาณผู้ที่เสี่ยงเป็นโรคความดันโลหิตสูงลดน้อยลงได้ และแนวโน้มอาหารเพื่อสุขภาพกำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน นอกจากนี้การพัฒนาข้าวเกรียบลดเกลือจากซูริมิยังถือเป็นการเพิ่มช่องทางการตลาดของผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของข้าวเกรียบซูริมิที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ปริมาณแตกต่างกัน

การเตรียมวัตถุดิบดังตารางที่ 1 โดยนำซูริมิมาละลายที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผสมกับกระเทียมและรากผักชีบดละเอียด จากนั้นนวดผสมกับแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี พริกไทย น้ำสะอาดที่อุณหภูมิ 50-60°C และโซเดียมคลอไรด์ นวดส่วนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 1½ นิ้ว, ความยาวประมาณ 7-8 นิ้ว) นึ่งให้สุกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แช่ในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 5°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หั่นเป็นชิ้นบางๆ จากนั้นอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำมาทอดที่อุณหภูมิ 175-200 °C เป็นเวลา 4-5 วินาที บรรจุไว้ในถุงอลูมิเนียมฟอยด์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องโดยดัดแปลงมาจากการศึกษาของกัทลี (2551) (ทำการทดลองในช่วงเดือนกุมภาพันธ์-มิถุนายน)

Table 1 Ingredients of surimi cracker

Ingredients	S1 (%)	S1.5 (%)	S2 (%)
Surimi	14.60	14.60	14.60
Garlic	1.99	1.99	1.99
Celery Root	1	1	1
Cassava flour	43.9	43.4	42.9
Wheat flour	6.64	6.64	6.64
Rice flour	0.67	0.67	0.67
Pepper	1.2	1.2	1.2
Water	29	29	29
Salt	1	1.5	2

วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพด้านสี โดยนำข้าวเกรียบบดให้ละเอียดใส่ใน Petri dish วัดค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Minolta รุ่น CM-3500d ด้วยการวัด Reflectance (%R) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง D_{65}, Observer 10 องศา, ขนาด Aperture 30 มิลลิเมตร ค่าสีที่วัด ได้แก่ ค่า L* (ความสว่าง), a* (ทิศทางของสีแดง) และb* (ทิศทางของสีเหลือง) ทดลอง 10 ซ้ำ และด้านเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Lloyd รุ่น TA 500 หัวกดแบบหัวบอล 10 มิลลิเมตร และฐานรองรับรูปทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร หัวกดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยระยะทางการกดบนตัวอย่างร้อยละ 50 ของความสูงตัวอย่าง ทำการบันทึกค่า Hardness (ความแข็ง) มีหน่วยเป็นนิวตัน (N), Maximum Force (ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างแตกหัก) มีหน่วยเป็นนิวตัน (N), Distance (ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm.) และ Work (พลังงานใช้ในการทำลายตัวอย่าง) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรงต่อมิลลิเมตร (kgf.mm.) ทดลอง 10 ซ้ำ และทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น ความกรอบ รสเค็ม รสชาติโดยรวมและความชอบโดยรวม โดยวิธีให้คะแนนความชอบแบบ 9-point hedonic scale และความพอดีด้านรสเค็มแบบ 3-point just about right ใช้ผู้บริโภคกลุ่มรักสุขภาพทั่วไปจำนวน 30 คน แล้ววิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชั่น 12.0 คัดเลือกตัวอย่างข้าวเกรียบที่มีคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุดไปศึกษาต่อในขั้นตอนต่อไป

การศึกษาผลของการทดแทนเกลือโซเดียม (NaCl) ด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และไกลซีนที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวเกรียบจากซูริมิ

ทำการผลิตข้าวเกรียบซูริมิตามสูตรพื้นฐานที่ได้รับการคัดเลือกก่อนหน้านี้ มาศึกษาผลการทดแทนเกลือโซเดียมด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ร้อยละ 50 ของโซเดียมคลอไรด์ทั้งหมด (T2) และโพแทสเซียมคลอไรด์ร้อยละ 25 และไกลซีนร้อยละ 25 ของโซเดียมคลอไรด์ทั้งหมด (T3) เนื่องจากไกลซีนช่วยบดบังรสขมของโพแทสเซียมคลอไรด์ ลักษณะเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างจากสูตรพื้นฐาน และมีราคาถูก (วิฑรูย์ และสุจินดา, 2556) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณเกลือ (โซเดียมคลอไรด์) (AOAC., 2000) ค่าสีและลักษณะเนื้อสัมผัส และการประเมินทางประสาทสัมผัส (เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของข้าวเกรียบซูริมิที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ปริมาณแตกต่างกัน

จากการศึกษาสูตรพื้นฐานของข้าวเกรียบจากซูริมิที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ปริมาณแตกต่างกัน มีผลการทดสอบทางกายภาพดังแสดงใน Table 2 พบว่าการวัดค่าสีของข้าวเกรียบทั้ง 3 สูตร มีค่า L* (ความสว่าง) ค่า a* (สีแดง) และค่า b* (สีเหลือง) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P>0.05) และการวัดเนื้อสัมผัส มีค่า Hardness อยู่ในช่วง 8-9 N, Work อยู่ในช่วง 0.4-0.5 kgf.mm., Maximum force อยู่ในช่วง 9-10 N และ Distance อยู่ในช่วง 0.5-0.6 mm. และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของกัทลี (2551) ที่มีค่าสี L* 41.05-43.17, ค่า a* 9.26-10.00 และ ค่า b* 15.00-16.08 เนื่องจากเป็นข้าวเกรียบกระเพราอาจทำให้ค่าสีแตกต่างจากข้าวเกรียบซูริมิเล็กน้อย โดยข้าวเกรียบซูริมิจะมีค่า b* ที่สูงกว่า เนื่องจากซูริมิมีเนื้อสีเหลืองนวล ส่วนทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัสมีค่า Work อยู่ในช่วง 0.7-1.3 kgf.mm., Maximum force อยู่ในช่วง 15 N และ Distance อยู่ในช่วง 0.4-0.6 mm มีความสอดคล้องกับงานวิจัย ซึ่งถ้าความชื้นภายในข้าวเกรียบลดลง ข้าวเกรียบมีรอยแตกภายใน ทำให้ข้าวเกรียบเปราะ แตกหักง่าย ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุดและพลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่างก็จะลดลงได้

Table 2 Physical test of surimi cracker with salt at 1, 1.5 and 2%

	Color			Texture			
	L*^{ns}	a*^{ns}	b*^{ns}	Hardness (N)^{ns}	Work (kgf.mm.)^{ns}	Maximum force (N)^{ns}	Distance (mm.)^{ns}
S1	58.52±0.21	10.93±0.13	29.34±0.58	9.31±0.57	0.41±0.10	9.83±0.56	0.61±0.14
S1.5	58.13±0.45	10.40±0.51	28.49±0.22	9.38±0.44	0.50±0.26	10.83±0.46	0.50±0.50
S2	58.85±0.50	10.42±0.46	28.82±0.31	8.93±0.53	0.42±0.08	10.83±0.57	0.65±0.50

Letters (ns) within the same column and row indicate not significantly different (P>0.05)

Salt at 1% (S1), 1.5% (S1.5) and 2% (S2)

การยอมรับของผู้บริโภคดังแสดงใน Table 3 พบว่า S1.5 คือสูตรที่ใช้เกลือร้อยละ 1.5 เป็นที่ยอมรับมากที่สุด โดยได้คะแนนความชอบโดยรวมอยู่ที่ชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง และจากการพิจารณาความแตกต่างของแต่ละสูตร รสเค็ม รสชาติโดยรวม มีความแตกต่างกับ S1 และ S2 อย่างมีนัยสำคัญ (P≤0.05) เนื่องจากข้าวเกรียบจากซูริมิที่ผลิตได้มีส่วนผสมของเกลือแตกต่างกันทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้รสเค็มที่แตกต่างกัน ส่วน Just

about right scale ด้านรสเค็ม ผู้บริโภคให้คะแนน S1 ในระดับรสเค็มที่น้อยเกินไป S1.5 ในระดับรสเค็มที่พอดี และ S2 ในระดับรสเค็มที่มากเกินไป เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างค่า Net score และ Difference from norm S1.5 มีระดับความพอดีถึงร้อยละ 70 แต่ S1 และ S2 มีระดับความพอดีไม่ถึงร้อยละ 70 ส่งผลให้ตัวอย่างทั้ง 2 ต้องปรับระดับความเข้มของรสเค็ม โดย S1 ต้องปรับระดับความเข้มของรสเค็มให้มีรสเค็มเพิ่มขึ้น และ S2 ต้องปรับระดับความเข้มของรสเค็มให้มีรสเค็มลดลง ส่งผลให้คะแนนความชอบโดยรวมแตกต่างกันด้วย ส่วนลักษณะปรากฏ สี กลิ่น และความกรอบ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P>0.05) ดังนั้นจึงกำหนดให้ S1.5 เป็นสูตรพื้นฐานในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากซูริมิให้มีคุณภาพเทียบเคียงกับตัวอย่างที่ผู้บริโภคชอบมากที่สุดต่อไป

Table 3 Likeness scores of surimi cracker with salt at 1, 1.5 and 2%

Attributes	S1	S1.5	S2
Appearance^{ns}	6.06±1.04	6.16±1.17	6.06±0.94
Color^{ns}	6.16±0.98	6.53±0.68	6.10±0.84
Odor^{ns}	6.03±1.12	6.50±0.86	6.03±1.03
Crispness^{ns}	6.03±1.71	6.56±0.89	6.16±0.79
Salty	5.03±0.96^{c}	6.13±0.73^{a}	5.60±0.85^{b}
Overall taste	5.16±0.87^{c}	6.46±0.73^{a}	5.93±0.73^{b}
Overall liking	5.20±0.87^{c}	6.50±0.73^{a}	5.86±0.68^{b}

Different letters (A, B, C) within the same column indicate significantly different (P≤0.05)

Salt at 1% (S1), 1.5% (S1.5) and 2% (S2)

การศึกษาผลของการทดแทนเกลือโซเดียม (NaCl) ด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และไกลซีนต่อคุณภาพของข้าวเกรียบจากซูริมิ

จากการศึกษาปริมาณเกลือที่เหมาะสมในการทดลองก่อนหน้านี้คือ สูตร S1.5 ถูกเรียกว่า Control มาทดแทนเกลือด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ (T2) และโพแทสเซียมคลอไรด์ผสมไกลซีน (T3) ผลการทดสอบทางเคมีดังแสดงใน Table 4 พบว่าการวิเคราะห์ปริมาณเกลือของข้าวเกรียบทั้ง 3 สูตร มีปริมาณเกลือที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P≤0.05) เนื่องจาก T3 มีปริมาณโพแทสเซียมคลอไรด์ในสูตรน้อยที่สุด และมีการผสมกับไกลซีนแตกต่างกับ T2 ที่มีโพแทสเซียมคลอไรด์ในสูตรเท่ากับ Control โดยสาร Silver nitrate ($AgNO_3$) สามารถเข้าจับกับคลอไรด์ (Cl) ทั้งโซเดียมและโพแทสเซียมส่งผลให้คำนวณปริมาณเกลือออกมาได้เป็นเกลือที่จับกับคลอไรด์ ดังนั้นสารทดแทนเกลือที่เหมาะสำหรับการพัฒนาข้าวเกรียบลดเกลือจากซูริมิควรเป็นโพแทสเซียมคลอไรด์ผสมไกลซีน ซึ่งมีปริมาณเกลือน้อยที่สุดอยู่ที่ 3.01% ลดลงจาก Control มากกว่า 25% จึงสามารถระบุได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบลดเกลือจากซูริมิ

Table 4 Chemical test with KCl and glycine on quality attributes of surimi cracker

	salt content (%)
Control	4.60±0.12^{a}
T2	3.80±0.12^{b}
T3	3.01±0.05^{c}

Different letters (A, B, C) within the same column indicate significantly different (P≤0.05)

Salt substitute at salt 1.5% (Control), KCl 1.5% (T2) and KCl 0.75% + glycine 0.75% (T3)

การทดสอบทางกายภาพดังแสดงใน Table 5 พบว่าการวัดค่าสีของข้าวเกรียบทั้ง 3 สูตร มีค่า L* (ความสว่าง) ค่า a* (สีแดง) และค่า b* (สีเหลือง) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P>0.05) เนื่องจากเกลือ โพแทสเซียมคลอไรด์ และไกลซีนมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ไม่มีสีและไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ขุ่น นอกจากนั้นยังมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน (Gerhard, 2006) และการวัดเนื้อสัมผัส มีค่าHardness, Work, Maximum force และ Distance ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P>0.05) ซึ่งมีความสอดคล้องเช่นเดียวกับงานวิจัยของกัทลี (2551) ที่มีค่า Work อยู่ในช่วง 0.7-1.3 kgf.mm., Maximum force อยู่ในช่วง 15 N และDistance อยู่ในช่วง 0.4-0.6 mm. จะเห็นได้ว่าการทดแทนเกลือด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมคลอไรด์ + ไกลซีนไม่มีผลต่อคุณภาพทางด้านสีและลักษณะเนื้อสัมผัส

Table 5 Physical test with KCl and glycine on quality attributes of surimi cracker

	Color			Texture			
	L^{*ns}	a^{*ns}	b^{*ns}	Hardness (N)^{ns}	Work (kgf.mm.)^{ns}	Maximum force (N)^{ns}	Distance (mm.)^{ns}
Control	59.86±0.62	11.63±0.13	29.74±0.44	9.33±0.37	0.39±0.13	11.00±0.39	0.53±0.07
T2	59.10±0.07	11.84±0.27	30.75±0.19	9.92±0.19	0.45±0.07	11.83±0.56	0.50±0.26
T3	58.22±0.46	11.50±0.36	30.60±0.12	9.65±0.53	0.43±0.10	10.83±0.28	0.46±0.10

Letters (ns) within the same column and row indicate not significantly different (P>0.05)

Salt substitute at salt 1.5% (Control), KCl 1.5% (T2) and KCl 0.75% + glycine 0.75% (T3)

การยอมรับของผู้บริโภคดังแสดงใน Table 6 พบว่าค่าคะแนนลักษณะปรากฏ สี กลิ่น และความกรอบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P>0.05) ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบด้านสี และลักษณะเนื้อสัมผัสทางเครื่องมือ แต่มีค่าคะแนนรสเค็ม รสชาติโดยรวมและความชอบโดยรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P≤0.05) โดย T3 และ Control มีค่าคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุดอยู่ที่ชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง และมีค่าคะแนนในแต่ละคุณลักษณะมากที่สุด เนื่องจาก T3 มีการใช้ไกลซีนที่ให้รสหวานเพื่อบดบังรสขมของโพแทสเซียมคลอไรด์ทำให้ผู้บริโภครับรู้รสชาติของโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ลดลงสามารถยอมรับได้เทียบเท่ากับสูตร Control แต่ T2 มีค่าคะแนนความชอบในแต่ละคุณลักษณะน้อย เนื่องจากมีรสขมจากโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ผู้บริโภคไม่ต้องการมากเกินไป และมีรสขมที่ติดลิ้นหลังรับประทาน ส่งผลให้ Just about right scale ด้านรสเค็ม พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความถี่ Control ในระดับรสเค็มที่พอดี T2 และ T3 ในระดับรสเค็มที่น้อยเกินไป เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างค่า Net score และ Difference from norm Control มีระดับความพอดีถึงร้อยละ 70 แต่ T2 และ T3 มีระดับความพอดีไม่ถึงร้อยละ 70 ส่งผลให้ตัวอย่างทั้ง 2 ต้องปรับระดับความเข้มของรสเค็ม โดยต้องปรับระดับความเข้มของรสเค็มให้มีรสเค็มเพิ่มขึ้น จากนั้นวิเคราะห์ Penalty ดังรูปภาพที่ 1 พบว่า T2 และ T3 มีค่า NE ของ Meandrop น้อยกว่า 1.5 และมีร้อยละคนมากกว่าร้อยละ 20 จึงถือว่ามีความสำคัญในระดับปานกลาง แต่เมื่อพิจารณาอุปสรรคและโอกาสจะพบว่า T2 มีโอกาสมากกว่าอุปสรรค ต้องมีการปรับระดับด้านรสเค็มให้มีรสเค็มเพิ่มขึ้น แต่ T3 มีอุปสรรคมากกว่าโอกาส ไม่ต้องมีการปรับระดับด้านรสเค็มแต่อย่างใด เพราะอาจจะมีความเสี่ยงต่อความชอบของผู้บริโภคได้ ดังนั้นจึงกำหนดให้ T3 ที่มีโพแทสเซียมคลอไรด์ร้อยละ 0.75 ผสมไกลซีนร้อยละ 0.75 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีค่าคะแนนในแต่ละคุณลักษณะทุกด้านใกล้เคียงกับสูตรพื้นฐานมากที่สุด โดยความพอดีด้านรสเค็มไม่ต้องมีการปรับระดับความเข้มของรสเค็ม เนื่องจากมีอุปสรรคมากกว่าโอกาส หากมีการปรับจะทำให้ความชอบของผู้บริโภคเปลี่ยนไปอาจจะชอบมากขึ้นหรือไม่ชอบก็ได้

Table 6 Likeness scores with KCl and glycine on quality attributes of surimi cracker

Attributes	Control	T2	T3
Appearance^{ns}	6.36±1.15	6.26±1.08	6.26±0.86
Color^{ns}	6.40±0.98	6.10±0.84	6.60±0.68
Odor^{ns}	6.46±0.97	6.16±0.98	6.63±0.99
Crispness^{ns}	6.60±0.89	6.56±1.00	6.93±0.94
Salty	6.46±0.86^{a}	5.73±0.98^{b}	6.03±1.06^{ab}
Overall taste	6.36±1.03^{a}	5.80±0.92^{b}	6.03±0.80^{ab}
Overall liking	6.43±0.97^{a}	5.76±0.97^{b}	6.03±0.85^{ab}

Different letters (A, B) within the same column indicate significantly different (P≤0.05)

Salt substitute at salt 1.5% (Control), KCl 1.5% (T2) and KCl 0.75% + glycine 0.75% (T3)

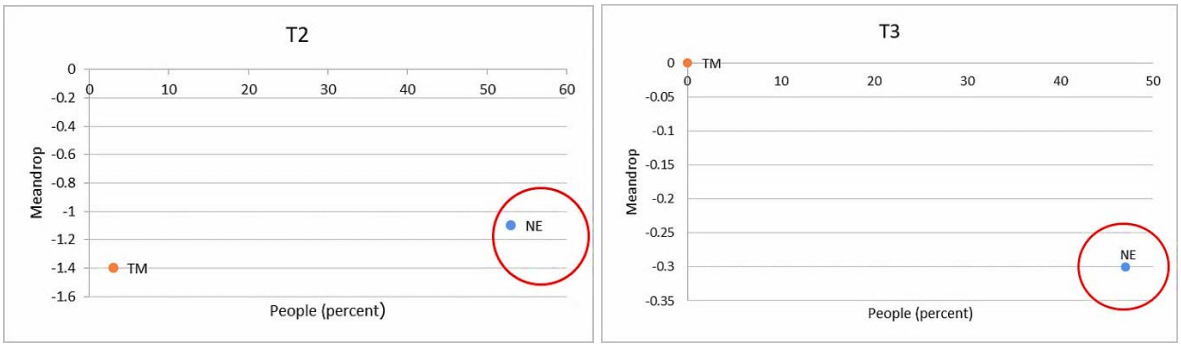


Figure 1 Penalty analysis of just about right scale with KCl 1.5% (T2) and KCl 0.75% + glycine 0.75% (T3) on salty attributes of surimi cracker

สรุป

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบลดเกลือจากซูริมิ พบว่าปริมาณโพแทสเซียมคลอไรด์ร้อยละ 0.75 + ไกลซีนร้อยละ 0.75 มีค่าสี ลักษณะเนื้อสัมผัส และการประเมินทางประสาทสัมผัสผู้บริโภคให้การยอมรับไม่แตกต่างกับสูตรพื้นฐานอย่างมีนัยสำคัญ (P>0.05) มีคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุดอยู่ที่ชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง ส่วนปริมาณเกลืออยู่ที่ร้อยละ 3.01 ซึ่งมีปริมาณลดลงจากสูตรพื้นฐานมากกว่าร้อยละ 25 และปริมาณเกลือสูงสุดที่องค์การอนามัยโลกแนะนำให้รับประทานคือไม่เกิน 5-6 กรัมต่อวัน หรือเพียง 1 ช้อนชาต่อวัน คิดเป็นปริมาณโซเดียมประมาณ 2,300 มิลลิกรัมต่อวัน จากงานวิจัยสามารถระบุได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่มีการลดปริมาณโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งสามารถระบุฉลาก GDA บนผลิตภัณฑ์ได้ เป็นทางเลือกหนึ่งให้กับคนที่เป็นโรคความดันโลหิตสูง และคนที่รักสุขภาพทั่วไปเลือกรับประทาน ช่วยลดภาระของรัฐบาลในการดูแลผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปีให้ลดลง และผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดสำหรับผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวอื่นๆ ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตรที่สนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา

เอกสารอ้างอิง

กัทลี จันทร์เจนจบ. 2551. **การใช้โครงข่ายใยประสาทเทียมในการทำนายกระบวนการอบแห้งของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปรสกะเพรา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิฑูรย์ ปริญญาวิวัฒน์กุล และสุจินดา ศรีวัฒนะ. 2556. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไส้กรอกเวียนนาลดโซเดียม รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานที่ปรึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีประจำสถานเอกอัคราชทูต ณ กรุงวอชิงตัน**. คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

วันทนีย์ เกรียงสินยศ. 2555. **ลดโซเดียม ยืดอายุ**. องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก ในพระบรมราชูปถัมภ์ กรุงเทพฯ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. 2560. **ฉลากโภชนาการ 'ทางเลือกสุขภาพ' สร้างพลังเศรษฐกิจสู่ Thailand4.0**. แหล่งที่มา [http://www.thaihealth.or.th] เข้าถึงวันที่ 11 ธันวาคม 2560.

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข. 2541. "**ประกาศกระทรวสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ. 2541 เรื่อง ฉลากโภชนาการ**". ราชกิจจานุเบกษา ฉบับทั่วไปเล่ม 115 ตอนที่ 47ง กรุงเทพฯ

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข. 2559. "**ประกาศกระทรวสาธารณสุข (ฉบับที่ 373) พ.ศ. 2559 เรื่อง การแสดงสัญลักษณ์โภชนาการบนฉลากอาหาร**". ราชกิจจานุเบกษา ฉบับทั่วไปเล่ม 133 ตอนที่ 47ง กรุงเทพฯ

สำนักโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. 2554. **คู่มือการดำเนินงานโครงการหมู่บ้าน/ชุมชน ลดหวาน มัน เค็ม**. กรุงเทพฯ: สำนักงานกิจการโรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก. http://nutrition.anamai.moph.go.th/temp/ main/index.php.

สำนักโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. 2558. **รายงานประจำปี 2558**. กรุงเทพฯ: สำนักงานกิจการโรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึกในพระบรมราชูปถัม. http://thaincd.com/document/file/download/paper-manual/ Annual-report-2015.pdf.

AOAC. 2000. **Official method of analysis of AOAC international**. 17th ed. The association of official analytical chemists, Virginia.

Gerhard, F. 2006. **Meat Products Handbook**. Woodhead Publishing Limited, England.

Kilcast, D. and F. Angus. 2007. **Reducing salt in foods :Practical strategies**. WoodheadPublishing Limited, England.

Ogawa, T., T. Nakamura, E.Tsuji , Y. Miyanaga , H. Nakagawa , H. Hirabayashi, andT. Uchida. 2004. **The combination effect of l-Arginine and NaCl on bitterness suppression of amino acid solutions**. Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 52 : 172-177.

Waimaleongora-Ek, P. 2006. **Sensory characteristics of salt substitute containing l-arginine**. Master's thesis. The Department of Food Science. Louisiana State University.

World Health Organization and Food Standards Agency. 2010. **Creating an enabling environment for population-based salt reduction strategies**. http://www.naos.aesan.msps.es/naos/Creating _an_enabling_environment.pdf.

World Hypertension League. 2010. **Salt and high blood pressure**. http://www.worldhypertensionleague.org/pages/WHD2010.aspx.

การพัฒนาหมูยอเสริมเส้นใยจากเซลลูโลสแบคทีเรีย

Development of Mou-Yaw (Boiled Pork Sausage) Supplemented with Fiber Bacterial Cellulose

สะไบ ลีลาพีระพันธ์[1*] อนุวัตร แจ้งชัด[1] กมลวรรณ แจ้งชัด[1] และ พิสิฏฐ์ ธรรมวิถี[1]

Sabai Leelapheeraphun[1*], Anuvat Jangchud[1], Kamolwan Jangchud[1] and Pisit Dhamvithee[1]

บทคัดย่อ

หมูยอเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากเนื้อสัตว์ที่ได้รับความนิยมมากในประเทศไทย และมีไขมันอิ่มตัวในปริมาณที่สูงซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ดังนั้นการศึกษาการลดปริมาณไขมันในหมูยอจึงควรค่าแก่การศึกษา จากการสำรวจพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคจำนวน 116 คน พบว่าผู้บริโภคร้อยละ 97.4 เห็นด้วยกับการพัฒนาหมูยอไขมันต่ำ โดยหมูยอที่ผู้บริโภคต้องการมากที่สุด คือหมูยอพริกไทยดำ (ร้อยละ 70.4) จึงได้วิจัยเพื่อพัฒนาหมูยอโดยใช้ เส้นใยจากเซลลูโลสแบคทีเรียมาทดแทนไขมัน งานวิจัยเริ่มจากสูตรต้นแบบมีปริมาณไขมันร้อยละ 13 จากนั้นศึกษาการเติมเซลลูโลสแบคทีเรียเพื่อทดแทนไขมันในระดับต่างๆ เป็นร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักสูตร จากการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คนด้วยวิธี 9 Point Hedonic scale พบว่าหมูยอที่ใช้เซลลูโลสแบคทีเรียทดแทนไขมันที่ร้อยละ 50 ไม่มีความแตกต่างกับสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่พบว่าความสามารถในการอุ้มน้ำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อนำมาส่องกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 750 เท่าโดยตัวอย่างที่ใช้เซลลูโลสแบคทีเรียทดแทนไขมันร้อยละ 50 มีลักษณะโครงสร้างเส้นใยที่ชัดเจน และพบโพรงอากาศมากขึ้นกว่าสูตรควบคุม หากพิจารณาผลการดลองทั้งหมด การทดแทนไขมันด้วย BC ร้อยละ 50 มีความเหมาะสมที่สุด

ABSTRACT

Mou-Yaw is one of the most delicious and popular traditional meat processed products in Thailand, However, the high amount of saturated fatty acid from meat ingredient of Mou-Yaw is drawn to the health concern. To reduce fat content in Mou-Yaw is very promising and worth to study. Consumer survey from 116 consumers showed that 97.4 % needed a low fat product and 70.4% needed a black pepper flavor. Development of high fibrous Mou-Yaw from Bacterial Cellulose to reduce fat content was conducted. The basic formula of Mou-Yaw contained 13% fat, then fat was varied and replaced by bacterial cellulose at different levels (0, 25, 50, 75 and 100%). 9 points hedonic scale was applied to measure sensory acceptance by 30 untrained panelists. The result showed that there was no significantly different ($p > 0.05$) when replacing fat at 50% bacterial cellulose compared to control. Water holding capacity decreased significantly ($p \leq 0.05$) and obviously shown by Scanning Electron Microscope (SEM) at 750X magnification. Sample with 50% bacterial cellulose substitute fat showed the clearer structure of fibrous filament and larger cavity than control. In conclusion, the formula with fat replacement by BC 50% was suitable for further study.

Key Words: Bacterial Cellulose (BC), Mou-Yaw (Boiled Pork Sausage), Scanning Electron Microscope (SEM), Development

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

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ผลิตภัณฑ์หมูยอ (Mou-Yaw) เป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปเนื้อสัตว์ที่นิยมรับประทานกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือของประเทศไทย นิยมนำมาประกอบอาหารเพื่อรับประทานในรูปแบบต่างๆ หมูยอจะมีส่วนประกอบหลักคือ เนื้อหมูและไขมันโดยทั่วไปจะใช้มันหมูแข็ง ซึ่งจะมีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวสูงประมาณร้อยละ 45 ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเพิ่มระดับคอเลสเตอรอล หากรับประทานต่อเนื่องอาจทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของไขมัน 2 ชนิด ได้แก่ คอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในกระแสโลหิต นำไปสู่ภาวะไขมันในเลือดสูง เส้นเลือดตีบ ความดันโลหิตสูง และโรคเส้นเลือดเลี้ยงหัวใจตีบ เนื่องจากคุณสมบัติของหมูยอที่ต้องการควรจะมีไขมันเป็นองค์ประกอบไม่เกินร้อยละ 24 ของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ตามเกณฑ์ของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2539) ได้กำหนดไว้ จึงเป็นที่มาของการพัฒนาหมูยอเสริมเส้นใย เพื่อทดแทนไขมัน เพื่อให้สอดคล้องกับกระแสผู้บริโภคในปัจจุบัน ที่ใส่ใจในสุขภาพมากขึ้น เพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภคได้รับประทานสินค้าที่มีประโยชน์แก่ร่างกาย โดยใช้เส้นใยเซลลูโลสแบคทีเรีย (Bacterial Cellulose, BC) หรือที่รู้จักกันทั่วไปคือวุ้นมะพร้าว (Nata de coco) เนื่องจากมีความละเอียดอ่อนและนุ่มกว่าเส้นใยที่พบในผักและผลไม้ เมื่อรับประทานเข้าไปจะช่วยเรื่องระบบการย่อยและขับถ่ายของร่างกายได้เป็นอย่างดี รวมถึงสามารถดูดซึมสารพิษต่างๆ ในระบบการย่อยของร่างกายด้วย (สุภัตรา, 2553) จึงเป็นที่มาของการพัฒนาหมูยอเสริมเส้นใยจาก BC ซึ่งนวลอนงค์ (2539) ได้มีการศึกษาและแบ่งออกเป็น 4 เกรด ได้แก่ A, B, C และ D ซึ่ง BC เกรด A จะมีความหนา 1-1.5 เซนติเมตร ผิวหน้าแผ่นวุ้นเรียบเนียน มีความเหนียวนุ่ม ไม่แยกตัวเป็นชั้น ไม่ยุบตัว เกรด B เกิดจากปัญหาการสั่นสะเทือนระหว่างกระบวนการผลิต ส่งผลให้ผิวหน้าวุ้นไม่เรียบ แต่ยังมีความเหนียวนุ่ม แยกตัวเป็นชั้น เกรด C เป็นวุ้นที่ไม่ได้คุณภาพ เป็นโรค มีความหนาไม่ได้ตามต้องการ นิยมนำมาตัดแต่งเป็นวุ้นลูกเต๋าและเกรด D เป็นเศษวุ้นจากการตัดแต่งจาก BC เพื่อขาย จากที่กล่าวมาทั้งหมด ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษา BC เกรด B มาเพื่อสร้างมูลค่าให้เกิดมูลค่า

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาหมูยอเส้นใยสูงจาก BC เกรด B มาใช้ได้ พร้อมทั้งศึกษา ปริมาณของ BC ที่เหมาะสมในหมูยอ โดย ให้เป็นตอบโจทย์ของผู้บริโภคที่ห่วงใยสุขภาพที่มากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

การคัดเลือกสูตรพื้นฐาน

ศึกษาเพื่อค้นหาสูตรพื้นฐาน โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) มีสิ่งทดลอง (Treatment) ได้แก่ เนื้อหมูที่มีปริมาณไขมันร้อยละ 7 มันหมูแข็ง น้ำแข็ง และส่วนผสมอื่นเป็นชุดควบคุม ทำการปรับปริมาณไขมันให้อยู่ในช่วงร้อยละ 13 – 21 โดยอ้างอิงจากตราตัวอย่างหมูยอที่ผู้บริโภคนิยมดังแสดงใน Table 1 ซึ่งทำการทดลองทั้งสิ้น 4 สูตรและทำซ้ำเฉพาะสูตรควบคุม หาสูตรต้นแบบโดยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9-point hedonic scale) ร่วมกับการทดสอบความพอดีด้านรสเค็ม 3 ระดับ โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวนทั้งสิ้น 30 คน และดำเนินการปรับสูตรจนได้สูตรที่ผู้ทดสอบยอมรับ การเตรียมตัวอย่างด้วยการนำตัวอย่างมาหั่นเป็น 4 ส่วน และเตรียมโดยวิธีการนึ่งนาน 5 นาที ระหว่างเสิร์ฟควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 – 60 องศาเซลเซียส

Table 1 Mou-Yaw basic formula.

Formula	Ingredients (%)				
	Pork	Pork Fat	Ice	Spice	Salt
Formula 1[1]	63	17	13	6.4	0.6
Formula 2[2]	67	13	13	6.4	0.6
Formula 3[3]	59	21	13	6.4	0.6
Formula 4[4]	63	13	17	6.4	0.6

Source : [1] = The formula modified from CP recipe [2-4] = The formula (Adjust fat between 13-21%)

การเตรียมหมูยอ

นำน้ำแข็งใส่ในกระทะเพื่อลดอุณหภูมิ จากนั้นนำเนื้อหมูและมันหมูแข็งมาลดขนาด โดยใช้เครื่องบดหน้าแว่น 8 มิลลิเมตร โดยควบคุมอุณหภูมิขณะสับผสมอยู่ในช่วงอุณหภูมิ -4 - 0 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วระดับ 4 เติมเกลือ STPP น้ำปลาและน้ำแข็ง ½ ส่วน สับผสมนาน 1 นาที ระหว่างสับผสมให้กวาดเนื้อหมูและเครื่องปรุงที่ติดตามเครื่องและใส่น้ำแข็งอีก ½ ส่วนที่เหลือ ตามด้วยมันหมูและแป้งนาน 2 นาที ลดความเร็วเหลือระดับ 1 และใส่พริกไทยดำโดยกลับใบมีดย้อนทิศเพื่อให้พริกไทยกระจายให้ทั่วถึงจนได้ส่วนผสมที่เป็นมวลเหนียว (Batter) ควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 15 องศาเซลเซียส บรรจุใส่เครื่องอัดไส้ ซึ่งใช้ไส้ที่ทำจากโพลีเอไมด์ บรรจุก้อนละ 800 กรัมและมัดเชือกให้แน่น และนำมาลงแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 65 – 80 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที เช็คอุณหภูมิใจกลางหมูยอ > 70 องศาเซลเซียส และนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 2 – 6 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปตรวจสอบคุณภาพด้านต่างๆ ต่อไป

การทดสอบความพอดี

นำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ มาปรับปรุงรสชาติความเค็มต่อประเมินความพอดีโดยวิธีการนับจำนวนความถี่และคำนวณร้อยละ และจะต้องปรับปรุงรสชาติจนจำนวนคำตอบในระดับพอดีจะต้องเกินร้อยละ 70 จึงจะไม่ต้องปรับปรุงลักษณะนั้นอีก

Table 2 Formula Adjustment for Saltiness Reduction of Mou-Yaw.

Formula	%Pork	%Salt	%Other
Formula 4.1 (Control)	63.0	0.6	36.4
Formula 4.2	63.1	0.5	36.4
Formula 4.3	63.2	0.4	36.4

Source : [4.1] = The control formula

[4.2-43] = The formula (Adjust salt between 04-0.6)

การเตรียม BC

นำ BC ที่ได้มาล้างทำความสะอาดและทำการสะเด็ดน้ำออกนาน 15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักและนำมาบดผ่านเครื่องบด โดยใช้หน้าแว่นขนาด 3 มิลลิเมตร จำนวน 1 รอบ หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและบีบน้ำออกจนแห้ง ให้เหลือเฉพาะเส้นใยของ BC ในปริมาณร้อยละ 16 เมื่อเทียบกับน้ำหนักก่อนบด และนำมาชั่งน้ำหนักตามสูตรที่กำหนด (Table 3)

Table 3 Replacement of fat by BC in Mou-Yaw formula.

Formula	%Fat	%BC
Formula 1 (Control)	100	0
Formula 2	75	25
Formula 3	50	50
Formula 4	25	75
Formula 5	0	100

การศึกษาผลของการเสริมเส้นใย BC เพื่อทดแทนมันหมูต่อคุณภาพของหมูยอ

ศึกษาผลจากการเสริมเส้นใย BC เพื่อทดแทนมันหมูต่อคุณภาพของหมูยอ ซึ่งใช้สูตรพื้นฐานที่คัดเลือกมาได้ โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ (replications) ทดแทนเป็นร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักสูตร (Table 3) โดยบรรจุในโพลีเอไมด์ก้อนละ 800 กรัม และเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 2 – 6 องศาเซลเซียส เพื่อนำมาตรวจสอบคุณภาพทั้ง 2 ส่วน ได้แก่

1. คุณภาพของอิมัลชัน ตรวจสอบคุณภาพทางด้านกายภาพ ได้แก่ คุณภาพทางกายภาพของอิมัลชัน (Total Expressible Fluid; %TEF) เป็นการทดสอบความคงตัวของ Batter ตามวิธีของ Luo and Xu (2011) จะได้ตัวอย่างแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของแข็งและของเหลว นำมาแยกกันแล้วนำเข้าสูตรเพื่อคำนวณ ค่ายิ่งมากความคงตัวยิ่งน้อย (Choi *et al*., 2014) ทำการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์จำนวน 2 ซ้ำ
2. คุณภาพของหมูยอ ได้แก่
   2.1 องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเส้นใยหยาบ (Crude Fiber) และปริมาณไขมัน โดยดัดแปลงวิธีของ AOAC (2000) ทำการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์จำนวน 2 ซ้ำ
   2.2 คุณภาพด้านกายภาพ ได้แก่
      2.2.1 ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity; %WHC) โดยดัดแปลงวิธีของ Verbeken *et al*. (2005) ค่าการสูญเสียระหว่างการทำให้สุก (Cooking loss) โดยจะทำการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังให้ความร้อนและคำนวณการสูญเสียออกมาในรูปของร้อยละ ตามวิธีการของ Choi *et al*. (2013) ทำการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์จำนวน 2 ซ้ำ
      2.2.2 ค่าสี วัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer โดยดัดแปลงวิธีของ Jo *et al*. (2001) โดยทำตัดส่วนหัวและท้ายของหมูยอออกและหั่นเป็นท่อน ความยาวท่อนละ 2 เซนติเมตร โดยใช้หมูยอตัวอย่างละ 10 ชิ้น เพื่อวัดค่าสีจำนวน 10 ซ้ำ

2.2.3 ค่าเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA.XT Plus) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Jo *et al*. (2001) วัดแบบ Texture Profile Analysis (TPA) โดยตัดแต่งขนาดกว้าง x ยาว x สูง = 2x2x2 เซนติเมตร โดยควบคุมอุณหภูมิหมูยอให้อยู่ในช่วง 50 – 60 องศาเซลเซียส โดยใช้หมูยอตัวอย่างละ 10 ชิ้นเพื่อวิเคราะห์จำนวน 10 ซ้ำ

2.2.4 การส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning-Electron-Microscope; SEM)

2.3 คุณภาพด้านการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9-point hedonic scale) โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวนทั้งสิ้น 30 คน

2.4 คุณภาพด้านจุลินทรีย์ โดยอ้างอิงตามมาตรฐานกรมปศุสัตว์ โดยวางแผนเช็คเชื้อทุกๆ 3 วัน ได้แก่ วันที่ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 ตามลำดับ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการคัดเลือกสูตรพื้นฐาน

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของหมูยอ แสดงผลที่ได้ตาม Table 4 พบว่าหมูยอทั้ง 4 สูตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ($p > 0.05$) ได้แก่ ด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมจึงเลือกสูตรที่ 4 เพื่อพัฒนาต่อ เนื่องจากต้นทุนต่ำสุดและมีไขมันน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาจากคะแนนที่ได้ พบว่าต้องการปรับปรุงคะแนนให้ดีขึ้น โดยผู้ทดสอบมีข้อเสนอแนะว่าด้านรสชาติว่ารสเค็มมากเกินไป จึงดำเนินการปรับเพื่อหาความเค็มที่เหมาะสม โดยปรับลดเกลือเป็น 3 ระดับ ที่ร้อยละ 0.6, 0.5 และ 0.4 ตามลำดับ (Table 2) ใช้วิธีทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9-point hedonic scale) และปรับแบบสอบถาม โดยถามรสเค็ม (Table 5) และความพอดีด้านรสเค็มอีก 3 ระดับ (Table 6) พบว่า ตัวอย่างที่ 4.3 มีจำนวนคำตอบในระดับความพอดีด้านรสเค็มถึงร้อยละ 96.7 ซึ่งเมื่อคำตอบมีความพอดีมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 70 แสดงว่า ไม่ต้องปรับปรุงคุณลักษณะนั้นอีก เพราะมีความพอดีแล้ว (Meullennet *et al*., 2007; ASTM, 2009) โดยหลังจากที่ปรับปรุง พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนทุกด้านมากขึ้น (Table 5)

Table 4 Sensory evaluation of Mou-Yaw basic formula.

Treatments	Appearance^{ns}	Flavor^{ns}	Taste^{ns}	Firmness^{ns}	Overall liking^{ns}
Formula 1	6.4 ± 0.4	6.0 ± 0.2	6.0 ± 0.4	6.1 ± 0.6	6.1 ± 0.3
Formula 2	6.3 ± 0.3	6.0 ± 0.5	6.2 ± 0.4	6.5 ± 0.3	6.5 ± 0.2
Formula 3	6.5 ± 0.8	5.8 ± 0.2	5.9 ± 0.7	5.8 ± 0.5	5.8 ± 0.4
Formula 4	6.5 ± 0.4	5.9 ± 0.3	5.4 ± 0.8	5.6 ± 0.9	5.4 ± 0.8

^{ns} Mean within the same column are not significantly difference ($p > 0.05$).

Table 5 Sensory evaluation of Mou-Yaw. (After Adjusting Saltiness)

Treatments	Appearance^{ns}	Flavor^{ns}	Taste^{ns}	Salty^{ns}	Firmness^{ns}	Overall liking^{ns}
Formula 4.1	6.8 ± 0.4	5.9 ± 0.2	6.5 ± 0.1	6.3 ± 0.2	5.6 ± 0.2	6.1 ± 0.3
Formula 4.2	6.4 ± 0.2	6.0 ± 0.4	6.7 ± 0.1	6.5 ± 0.2	6.3 ± 0.4	6.5 ± 0.3
Formula 4.3	6.9 ± 0.1	6.5 ± 0.2	6.8 ± 0.2	6.7 ± 0.1	6.5 ± 0.5	6.7 ± 0.2

^{ns} Mean within the same column are not significantly difference ($p > 0.05$).

Table 6 3 Levels of Just About Right. (After Adjusting Saltiness)

Treatments	Level of Just About Right		
	Much too little	Just about right	Much too much
Formula 4.1	3 (10%)	15 (50%)	12 (40%)
Formula 4.2	2 (6.7%)	20 (66.7%)	8 (26.7%)
Formula 4.3	1 (3.3%)	29 (96.7%)	0 (0%)

ผลจากการศึกษาผลของการเสริมเส้นใย BC เพื่อทดแทนมันหมูต่อคุณภาพของหมูยอ

จากการศึกษาผลการเสริมเส้นใย BC เพื่อทดแทนมันหมูซึ่งทดแทนร้อยละ 0, 25, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ความคงตัวของอิมัลชัน (Emulsion Stability) พบว่าปริมาณของเหลวที่แยกได้ (Total Expressible Fluid; %TEF) ในทุกตัวอย่างไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสูตรควบคุม ($p > 0.05$)

เมื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ (Table 7) ซึ่งประกอบด้วยปริมาณเส้นใยหยาบและปริมาณไขมัน พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าตัวอย่าง 75% BC และ 100% BC จะมีเส้นใยหยาบมากกว่าสูตรควบคุมและมีปริมาณไขมันน้อยกว่าสูตรควบคุม

ส่วนของคุณภาพทางด้านกายภาพของหมูยอ (Table 7) ได้แก่ ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ โดยพบว่าตัวอย่างหมูยอ 25% BC ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสูตรควบคุม ($p > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกฤติกา (2558) ที่พบว่าการลดปริมาณไขมันในสูตรไส้กรอกโดยการเติมวัตถุดิบทดแทนไขมันจะส่งผลต่อค่า WHC ที่จะลดลงตามลำดับ แต่ขัดแย้งกับงานวิจัยของวิชชุดา (2552) ที่รายงานว่าหากมีการเพิ่มปริมาณ BC ในสินค้าไส้กรอกจะส่งผลทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำดีขึ้น ดังนั้น เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าปริมาณน้ำในสูตรที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความสามารถในการดูดน้ำของ BC ได้น้อยลง และยังพบว่าการเพิ่มปริมาณ BC ในสูตรยังส่งผลทำให้ค่าการสูญเสียน้ำระหว่างการทำให้สุกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ในส่วนของค่าสี พบว่าทุกตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสูตรควบคุม ($p > 0.05$) แต่มีแนวโน้มสว่างมากขึ้นตามลำดับ (Table 8) ส่วนค่าเนื้อสัมผัส (Table 9) พบว่าตัวอย่างมีแนวโน้มนิ่มลง โดยพบว่าทุกตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสูตรควบคุม ($p > 0.05$) โดยผลจากการนำมาส่องด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ 50 เท่า 750 เท่าและ 6,000 เท่า พบว่าจะเริ่มเห็นเป็นร่างแหที่มีการเกี่ยวพันที่หนามากขึ้นจากตัวอย่าง 50% BC ที่กำลังขยาย 50 เท่า และชัดเจนขึ้นเรื่อยๆ โดยเมื่อขยายกำลังขยายถึง 750 เท่าและ 6,000 เท่าตามลำดับ จะเห็นได้ชัดว่าการเพิ่มปริมาณ BC มีผลทำให้ผิวเกิดความไม่สม่ำเสมอและเกิดรูพรุนมากขึ้นตามลำดับ ส่งผลต่อความสามารถในการดูดน้ำที่น้อยลงเมื่อใส่ BC ถึงจุดหนึ่ง

Table 7 Effect of fat supplemented by BC on chemical and physical qualities.

Treatments	%Crude Fiber	%Fat	%TEF	%WHC	%Cooking Loss
Control	0.4 ± 0.1^{c}	14.6 ± 0.6^{a}	22.0 ± 1.0^{a}	91.9 ± 0.7^{a}	0.1 ± 0.0^{a}
25% BC	1.3 ± 0.1^{bc}	13.4 ± 0.7^{ab}	22.7 ± 0.8^{a}	88.0 ± 4.6^{ab}	0.1 ± 0.1^{a}
50% BC	2.1 ± 0.5^{ab}	13.3 ± 0.6^{ab}	23.1 ± 0.6^{a}	83.6 ± 1.3^{b}	0.6 ± 0.4^{a}
75% BC	2.2 ± 0.4^{ab}	11.2 ± 1.4^{bc}	23.8 ± 0.4^{a}	77.2 ± 1.4^{c}	0.5 ± 0.9^{a}
100% BC	2.6 ± 0.6^{a}	9.0 ± 1.2^{c}	24.5 ± 0.4^{a}	76.2 ± 0.2^{c}	0.9 ± 0.9^{a}

$^{a-c}$ Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

%TEF = Total Expressible Fluid

%WHC = Water holding capacity

Table 8 Effect of fat supplemented by BC on color qualities.

Treatments	L*	a*	b*
Control	61.0 ± 4.8	3.2 ± 0.5	17.2 ± 1.4
25% BC	62.6 ± 1.3	2.6 ± 0.7	16.9 ± 3.0
50% BC	62.9 ± 1.0	2.7 ± 1.0	16.8 ± 1.9
75% BC	63.7 ± 1.8	2.5 ± 0.8	15.8 ± 1.0
100% BC	63.8 ± 1.5	2.4 ± 0.7	15.8 ± 0.5

Table 9 Effect of fat supplemented by BC on texture qualities.

Treatments	Hardness (N) ^{ns}	Springiness (sec) ^{ns}	Cohesiveness ^{ns}	Gumminess ^{ns}	Chewiness (N.sec) ^{ns}
Control	7.0 ± 2.0	0.9 ± 0.0	0.5 ± 0.0	3.5 ± 1.4	2.8 ± 0.9
25% BC	6.6 ± 1.8	0.8 ± 0.0	0.5 ± 0.0	3.0 ± 1.1	2.4 ± 0.7
50% BC	5.4 ± 1.0	0.8 ± 0.0	0.4 ± 0.0	2.2 ± 0.2	1.9 ± 0.2
75% BC	6.0 ± 0.5	0.8 ± 0.0	0.4 ± 0.0	2.3 ± 0.2	1.8 ± 0.1
100% BC	6.3 ± 0.9	0.8 ± 0.0	0.4 ± 0.0	1.9 ± 0.8	1.8 ± 0.6

^{ns} Mean within the same column are not significantly difference ($p > 0.05$).

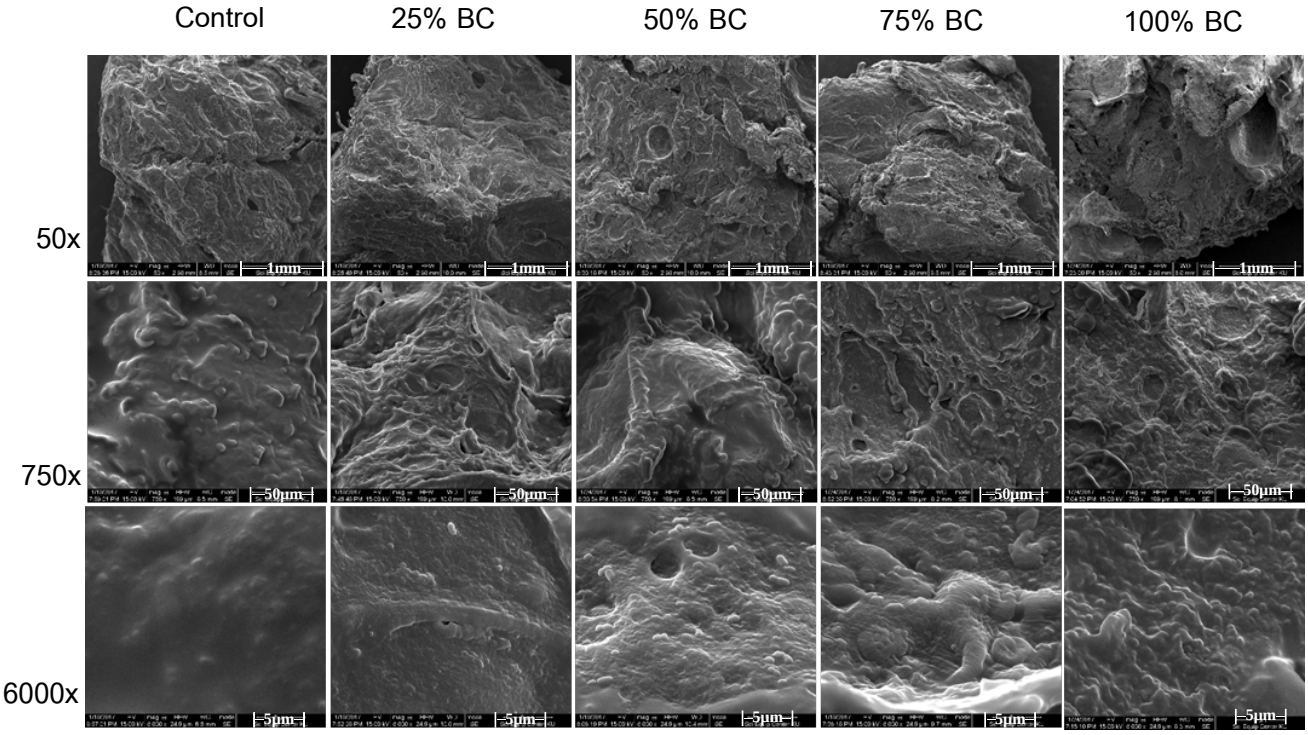


Figure 1 SEM of Mou-Yaw structure in different BC level.

ผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัส เมื่อพิจารณาด้านลักษณะปรากฏ (Table 10) พบว่าตัวอย่าง 25% BC และ 50% BC ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสูตรควบคุม ($p > 0.05$) ในส่วนของหัวข้ออื่นๆ ได้แก่ ด้านกลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบรวม พบว่าตัวอย่าง 100% BC มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) จากรายงานดังที่กล่าวมาทั้งหมด ด้วยเหตุผลว่าผู้ทดสอบจะยอมรับหรือปฏิเสธตัวอย่างหมูยอ จะพิจารณาด้านลักษณะปรากฏเป็นอันดับแรก จึงเลือกตัวอย่าง 50% BC เนื่องจากให้ประโยชน์สูงสุด เพราะสามารถเสริมเส้นใย BC ทดแทนมันหมูได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ โดยนำหมูยอเก็บในตู้ Open Type ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 2 - 6 องศาเซลเซียส พบว่าหมูยอสามารถเก็บไว้ได้นาน 12 วัน (Table 11)

Table 10 Effect of fat supplemented by BC on sensory evaluation.

Treatments	Appearance	Flavor	Taste	Firmness	Overall liking
Control	6.6 ± 0.8^{a}	6.1 ± 0.6^{a}	6.0 ± 0.5^{a}	6.1 ± 0.2^{a}	6.3 ± 0.5^{a}
25% BC	6.0 ± 0.6^{a}	5.8 ± 0.3^{ab}	6.1 ± 0.4^{a}	5.7 ± 0.8^{a}	5.8 ± 0.7^{a}
50% BC	5.6 ± 0.5^{a}	5.7 ± 0.6^{ab}	5.7 ± 0.4^{a}	5.6 ± 0.2^{a}	5.7 ± 0.3^{a}
75% BC	4.2 ± 0.2^{b}	5.1 ± 0.4^{ab}	5.3 ± 0.3^{ab}	4.7 ± 0.2^{ab}	4.7 ± 0.0^{ab}
100% BC	3.2 ± 0.7^{b}	4.2 ± 1.0^{b}	4.1 ± 0.7^{b}	3.4 ± 0.9^{b}	3.4 ± 1.0^{b}

$^{a-c}$Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

Table 11 Microbiological qualities of of Mou-Yaw during chilled storage (2 - 6 °C) by Department of Livestock Development (DLD) and the result at 12 and 15 days.

Microbiological	Standard (DLD)	Result (12 Days)	Result (15 Days)
Aerobic Plate Count (cfu/g)	$\leq 1x10^5$	10	TNTC at $1x10^6$
Clostridium perfringens (cfu/g)	ND	ND	ND
Coliforms (MPN/g)	≤ 100	< 10	TNTC at $1x10^4$
Enterococcus sp.(MPN/g)	≤ 100	< 100	120
Escherichia coli (cfu/g)	ND	ND	ND
L. monocytogenes (in 25 g)	ND	ND	ND
Salmonella spp. (in 25 g)	ND	ND	ND
Staphylococcus aureus (in 0.1 g)	ND	ND	ND
Yeasts / Molds (cfu/g)	≤ 100	<10	180
Campylobacter* (in 25 g)	ND	ND	ND

* Must monitor by DLD

TNTC = Too numerical to count

ND = Not Detect

สรุป

การนำเส้นใย BC มาเสริมในผลิตภัณฑ์หมูยอเพื่อทดแทนไขมันสามารถทดแทนได้ร้อยละ 50 โดยส่งผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำในหมูยอได้ลดลง โดยพบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใย BC จะทำให้หมูยอจะมีลักษณะหยาบ มีรูพรุนและพื้นผิวขรุขระมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งส่งผลต่อการยอมรับของผู้ทดสอบด้านลักษณะปรากฏที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อศึกษาระดับโครงสร้างโดยใช้เครื่อง SEM จะเห็นว่าหมูยอมีลักษณะโครงสร้างเส้นใยที่ชัดเจนและพบโพรงอากาศมากขึ้นกว่าสูตรควบคุม

จากนั้น เมื่อเก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 2 - 6 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างจะมีอายุการเก็บได้ 12 วันนับจากวันที่ผลิต จึงสรุปได้ว่าจากการทดลองสามารถเพิ่มเส้นใยหยาบได้ 5 เท่าและลดไขมันได้ร้อยละ 8.9

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้บริหารและเพื่อนพนักงาน บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) โรงงานหนองจอกที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนเครื่องมือและทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กฤติกา โพธิ์เย็น. 2558. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไส้กรอกไขมันต่ำโดยใช้แก่นตะวันเป็นสารทดแทนไขมัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2551. **ประกาศเรื่องเกณฑ์ด้านจุลชีววิทยาของสินค้าปศุสัตว์เพื่อการส่งออก**. 30 ธันวาคม 2551.

นวลอนงค์ ธรรมมานุธรรม. 2539. **การวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตและการตลาดวุ้นน้ำมะพร้าว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุภัตรา จอมทรักษ์. 2553. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไอศกรีมวานิลาผสมวุ้นมะพร้าว**. การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2539. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหมูยอ**. มอก. 1346-2539.

วิชชุดา สังข์แก้ว. 2552. ลักษณะทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของไส้กรอกแฟรงค์เฟอร์เตอร์เส้นใยสูงเสริมด้วยแบคทีเรียเซลลูโลส. **มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย** 29 (4): 111-122.

AOAC. 2000. **Official Methods of the Association of Official Analytical Chemists**. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg.

ASTM. 2009. Just-About-Right (JAR) Scales: Design, Usage, Benefits and Risks. L. Rothman and M. Parker., eds. **ASTM international manual series; MNL 63,** USA.

C. Jo, J.W. Lee, K.H. Lee and P.W. Byun. 2001. Quality properties of pork sausage prepared with water-soluble chitosan oligomer. **Meat Science.** 59: 369-375.

Choi, Y.S., K.s. Park ,H.W. Kim, D.H. Song, M.S. Choi, S.Y. Lee, H.D. Paik and C.J. Kim. 2013. Quality characteristics of reduced-fat frankfurters with pork fat replaced by sunflower seed oils and dietary fiber extracted from makgeolli lees. **Meat Science.** 93: 652-658.

Choi, Y.S., H.W. Kim, K.E. Hwang, D.H. Song., J.H. Choi., M.I. Lee, H.J. Chung and C.J. Kim. 2014. Physicochemical properties and sensory characteristics of reduced-fat frankfurters with pork back fat replaced by dietary fiber extracted from makgeolli lees. **Meat Science.** 96: 892-900.

Luo, Z. and Z. Xu. 2011. Characteristics and application of enzyme-modified carboxymethyl starch in sausages. **LWT-Food Science and Technology.** 44: 1993-1998.

Meullenet, J.F., R. Xiong and C.J. Findlay. 2007. **Multivariate and Probabilistic Analyses of Sensory Science Problems**. Blackwell publishing, USA.

Verbeken, D., N. Neirinck, P.V.D. Meeren and K. Dewettinck. 2005. Influence of *k*-carrageenan on thermal gelation of salt-soluble meat protein. **Meat Science.** 70: 161-166.

อิทธิพลของบรรจุภัณฑ์ติดซัสเซพเตอร์ต่อคุณภาพของพายชั้นในตู้อบไมโครเวฟ

Effect of Susceptor Combined Packaging on the Quality of Puff Pastry in the Microwave Oven

กนกศักดิ์ ลอยเลิศ[1] ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์[1*] และ งามทิพย์ ภู่วโรดม[1]

Kanoksak Loiloes[1], Tunyarut JinKarn[1*] and Ngamtip Poovarodom[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของซัสเซพเตอร์ต่อคุณภาพของพายชั้นแช่แข็งในตู้อบไมโครเวฟ กำหนดกำลังไฟในตู้อบไมโครเวฟ 5 ระดับ คือ 80, 240, 400, 560 และ 800 วัตต์ ระยะเวลาที่ 120, 150 และ 180 วินาที ตรวจวัดการขึ้นฟูและความชื้นของพายชั้นภายหลังการอบเพื่อหาสภาวะการอบที่เหมาะสมสำหรับใช้ศึกษาอิทธิพลของการใช้ซัสเซพเตอร์ภายในบรรจุภัณฑ์กระดาษร่วมกับการอบด้วยระบบไมโครเวฟ ผลการศึกษาพบว่าการขึ้นฟูของพายชั้นเพิ่มขึ้นเมื่อระดับกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาการอบเพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่ากำลังไฟฟ้าที่ 400 วัตต์ ระยะเวลา 150 วินาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบพายชั้น สำหรับอิทธิพลของการใช้ซัสเซพเตอร์ภายในบรรจุภัณฑ์ต่อคุณภาพการอบของพายชั้น พบว่า ความชื้นของพายชั้นลดลงในขณะที่ความกรอบเพิ่มขึ้นเทียบกับการไม่ใช้ซัสเซพเตอร์ การใช้ซัสเซพเตอร์ยังทำให้อุณหภูมิบริเวณผิวนอกของพายชั้นสูงกว่าอุณหภูมิภายในและบริเวณผิวภายนอกยังมีการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเกิดสีน้ำตาลบนผิวของพายชั้นเนื่องจากซัสเซพเตอร์สามารถกระจายความร้อนภายในบรรจุภัณฑ์ได้ดี

ABSTRACT

This research aims to investigate the effects of susceptor combined packaging on the quality of frozen puff pastry in the microwave oven. Microwave power levels were set at 80, 240, 400, 560, and 800 Watt and the baking times were set at 120, 150 and 180 seconds respectively. Puffiness and moisture content of the baked pastry were observed to identify the optimum baking condition. This optimum baking condition was selected for the study on the effects of susceptor combined paper packaging under the microwave oven. The results showed that the puffiness of the puff pastry by increasing the microwave power and the baking time. The optimum baking condition was at a power of 400 Watt with a baking time of 150 seconds. For the effects of susceptor combined packaging, the results showed that moisture content was reduced and the crispiness of the baked pie was also increased compared to a sample without the susceptor. The susceptor packaging induced significant higher temperature levels at the outer surface of the pie compared to the inner core. Furthermore, color change was significantly found showing a golden brown tone on the puff pastry surface since the susceptor helped transferring more heat inside the packages.

Key Words: packaging, microwave oven, susceptor, puff pastry

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

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันคนส่วนใหญ่มีการใช้ชีวิตอย่างเร่งรีบโดยเฉพาะในสังคมเมือง (Vadivambal and Jayas, 2010) ผู้บริโภคยุคใหม่นิยมใช้ไมโครเวฟในการอุ่นและเตรียมอาหาร เนื่องจากมีความสะดวกรวดเร็ว ไมโครเวฟเป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีสมบัติคล้ายแสง มีการหักเห ส่องผ่าน และการดูดซับพลังงานสามารถเกิดขึ้นได้ (Lohoff, 2011) สำหรับไมโครเวฟนั้นพลังงานอาจถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อน โดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคหรือการหมุนตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้อนุภาคหรือโมเลกุลชนกันจนเกิดความร้อนขึ้น (Okeke *et al*., 2014) ข้อเสียของไมโครเวฟ คือผิวหน้าของอาหารอาจจะนิ่ม อีกทั้งการเกิดสีน้ำตาลของผิวผลิตภัณฑ์อาหารอบไม่สามารถทำได้ดี (Albert *et al*., 2009) เนื่องจากการกระจายของอุณหภูมิที่ไม่เป็นระเบียบ ระยะเวลาให้ความร้อนที่เร็วส่งผลให้เกิดจุดร้อนและจุดเย็นขึ้นบนผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกระจายความร้อนที่ไม่ทั่วถึงในอาหารแช่แข็ง (Pitchai *et al*., 2011) ดังนั้นอาหารประเภทอบที่ทำจากแป้งที่ต้องการความกรอบด้านนอกนั้นโดยทั่วไปไม่สามารถทำได้ด้วยระบบไมโครเวฟตามปรกติ

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาผลของการใช้ซัสเซพเตอร์กับพายแช่แข็งบรรจุในบรรจุภัณฑ์ถ้วยกระดาษที่ใช้และไม่ใช้ซัสเซพเตอร์ ซึ่งซัสเซพเตอร์นั้นคือ ฟิล์มเมทอลไลซ์ ผลการทดลองพบว่าการใช้ซัสเซพเตอร์ทำให้เกิดสีน้ำตาลที่บริเวณผิวด้านล่างของพาย แต่ผิวด้านบนพายไม่มีการเกิดสีน้ำตาล เนื่องจากไม่มีการใช้ซัสเซพเตอร์และการกระจายของอุณหภูมิในชิ้นพายดีขึ้น ส่วนพายที่ไม่มีการใช้ซัสเซพเตอร์พบว่าแป้งไม่สุก (Chen *et al*., 2017) นอกจากนี้ยังพบข้อมูลเบื้องต้นของงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ซัสเซพเตอร์ในการอบหรือกระจายความร้อนในอาหาร (Main *et al*., 2007; Albert *et al*., 2009; Chen *et al*., 2017) อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาโดยละเอียดถึงอิทธิพลของการใช้ซัสเซพเตอร์ในบรรจุภัณฑ์ต่อลักษณะการกระจายความร้อนในขณะอบผลิตภัณฑ์อาหารกลุ่มแป้งที่ต้องการความกรอบ เช่นในกรณีพายชั้นแช่แข็ง งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์บรรจุภัณฑ์กระดาษที่มีซัสเซพเตอร์เพื่อใช้ในการอบพายชั้นแช่เข็งภายใต้ระบบไมโครเวฟ โดยจะศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพายชั้นในด้านการขึ้นฟู ความชื้น ความกรอบ การเปลี่ยนแปลงสี และการกระจายตัวของอุณหภูมิขณะอบ ผลงานวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบบรรจุภัณฑ์กระดาษหรือพลาสติกที่อาจใช้ซัสเซพเตอร์ในการอบอาหารสำหรับระบบไมโครเวฟต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การหาระดับกำลังไฟฟ้า และระยะเวลาการอบที่เหมาะสมของพายชั้นในตู้อบไมโครเวฟ

เตรียมโดพายชั้น (puff pastry dough) ขนาด 8.0x4.0x0.9 เซนติเมตร เก็บในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาทำการทดลอง (ดัดแปลงสภาวะการเก็บอาหารแช่แข็งจาก Albert *et al*., 2009) อบพายชั้นโดยวางบนแผ่นกระดาษแข็งขนาด 12.0x7.0 เซนติเมตร กำหนดกำลังไฟฟ้า 5 ระดับ คือ 80, 240, 400, 560 และ 800 วัตต์ ระยะเวลาการอบ 120, 150 และ 180 วินาที (ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) ในการทดลองใช้เครื่องไมโครเวฟ ยี่ห้อ Toshiba รุ่น ER-G23SC(W) ที่มีการดัดแปลงให้สามารถเชื่อมต่อสายวัดอุณหภูมิ(Thermocouple (Graptec)) และเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger, Graptec GL 240) แสดงดังภาพที่ 1 ภายหลังการอบ ตรวจสอบการขึ้นฟู และความชื้นของพายชั้น เพื่อเลือกระดับกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาการอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการศึกษาขั้นตอนต่อไป

2. **การวัดคุณภาพของพายชั้นภายหลังการอบ**

วัดการขึ้นฟู (puffiness) ของพายชั้นหลังจากออกจากตู้อบไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิห้องเทียบกับก่อนอบพายชั้น (โดพายชั้น) โดยใช้เครื่องวัดความหนา Mitoyo (ID-C112BS) (ดัดแปลงวิธีวัดการขึ้นฟูจาก Jiamjariyatam *et al*., 2016) ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

วัดความชื้น (moisture content) ของพายชั้นหลังจากอบด้วยไมโครเวฟ เตรียมตัวอย่างพายชั้น 2 ส่วน คือ เปลือกนอก (crust) และด้านใน (crumb) ของพายชั้น ชั่งน้ำหนักตัวอย่างละ 2 กรัม ใช้อุณหภูมิในการอบที่ 105.0±1.0 องศาเซลเซียส (ดัดแปลงวิธีวัดความชื้นจากวิธีมาตรฐาน AOAC 2000) ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

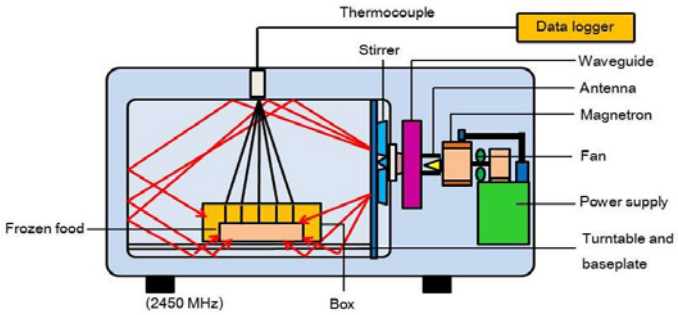


Figure 1 Thermocouple and data logger setup for the microwave oven

3. **การศึกษาอิทธิพลซัสเซพเตอร์ร่วมกับบรรจุภัณฑ์กระดาษต่อคุณภาพของพายชั้นในตู้อบไมโครเวฟ**

ใช้ฟิล์มเมทอลไลซ์พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลท (MPET) ความหนา 0.015 มิลลิเมตร ค่าความหนาแน่นเชิงแสง (optical density) 0.3 ขนาด 4.0x3.0 เซนติเมตร (ดัดแปลงจาก Lubuza and Meister, 1992) และเตรียมกระดาษแข็งน้ำหนักมาตรฐาน 240 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ขึ้นรูปเป็นกล่องขนาด (LxWxD) 12.0x7.0x3.0 เซนติเมตร อบพายชั้นในไมโครเวฟ 3 แบบ คือ ชุดควบคุมโดยอบบนแผ่นกระดาษ, อบโดยบรรจุในกล่องกระดาษแข็ง และอบโดยบรรจุกล่องกระดาษแข็งติดซัสเซพเตอร์ตรงกึ่งกลางของบรรจุภัณฑ์ด้านในทั้งด้านบนและด้านล่างของกล่อง (Figure 2) ที่ระดับกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาการอบที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในข้อ 1 วัดค่าความชื้น (ตามข้อ 2) วัดความกรอบ การเปลี่ยนแปลงสี อุณหภูมิของพายชั้นหลังอบเพิ่มเติม ทำการทดลองตัวอย่างทดสอบละ 3 ซ้ำ

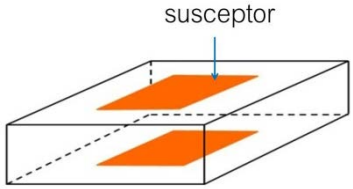


Figure 2 Susceptor attachment in the paper packaging

วัดความกรอบ(crispness) โดยเก็บพายชั้นที่อุณหภูมิห้องให้เย็นตัวลง เป็นเวลา 20 นาที หลังออกจากตู้อบไมโครเวฟ ในกล่องกระดาษแข็ง (ดัดแปลงวิธีการเก็บพายชั้นจาก Main *et al*., 2007) วัดลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Stable Micro Systems, TA.XT plus) ใช้หัววัดกดลงไปเป็นระยะทาง 2 มิลลิเมตร ของความหนาพายชั้น ด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อวินาที (ดัดแปลงวิธีวัดความกรอบจาก Salvador *et al*., 2009)

วัดการเปลี่ยนแปลงสี (total color change (ΔE)) ของพายชั้น โดยใช้เครื่องวัดสี Minolta (CR-310) ทั้งผิวด้านบน ด้านล่าง และด้านข้างของพายชั้น (Figure 3b) โดยใช้สเกลสี L* a* และ b* ทำการทดสอบ หลังการอบเป็นเวลา 15 นาที บันทึกการเปลี่ยนแปลงสี (ดัดแปลงวิธีวัดสีจาก Main *et al*., 2007)

วัดอุณหภูมิของพายชั้นโดยใช้อุปกรณ์ Thermocouple (ชนิด เค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มิลลิเมตร) จำนวน 5 จุด (ดัดแปลงตำแหน่งวัดอุณหภูมิจาก Fakhouri and Ramaswamy,1993; Houšová and Hoke, 2002) (Figure 1a) บันทึกอุณหภูมิที่ได้โดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (data logger, Graptec GL 240) ทำการทดลองโดยใช้กล่องกระดาษแข็ง เจาะรูด้านบนกล่องจำนวน 5 จุด (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร) ใช้สายวัดอุณหภูมิลอดผ่านรูเจาะกล่องกระดาษแข็งลึกและกดลึกลงไปจนถึงระยะครึ่งหนึ่งของความหนาโดพายชั้น (Figure 3a) (ดัดแปลงระยะการเจาะผลิตภัณฑ์จาก Pitchai *et al*., 2014) บันทึกอุณหภูมิทุกๆ 1 วินาที

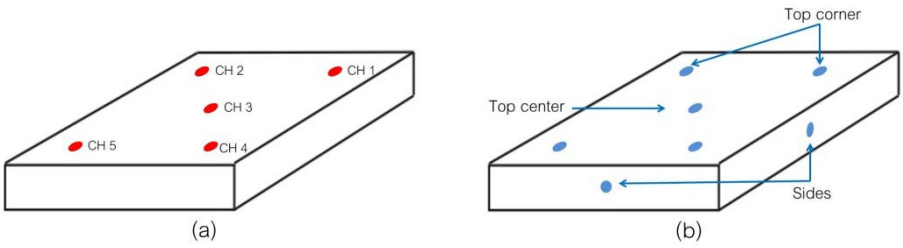


Figure 3 Positions for (a) temperature measurement and (b) color measurement for the puff pastry

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาระดับกำลังไฟฟ้า และระยะเวลาการอบต่อคุณภาพของพายชั้นในตู้อบไมโครเวฟ

จากการทดลองพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ทำให้พายชั้นขึ้นฟูได้ดีมี 3 ระดับ คือ 400, 560 และ 800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 120, 150 และ 180 วินาที (Figure 4) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาอบและกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพายชั้นจะขึ้นฟูมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่กำลังไฟฟ้า 560 วัตต์และ ระยะเวลา 150 และ 180 วินาที พายชั้นจะขึ้นฟูสูงสุด อย่างไรก็ตามลักษณะปรากฏของพายชั้นนั้นกรอบเกินไปจนแตกหักง่าย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ 400 วัตต์และระยะเวลา 150 วินาทีจะเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการอบพายชั้น โดยพบว่าที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ระยะเวลา 150 และ180 วินาที นั้นพายชั้นไหม้เสียหาย เนื่องจากปริมาณความชื้นหรือไอน้ำของพายชั้นเหลือน้อยมาก (Figure 5) สำหรับพายชั้นจะขึ้นฟูทันทีที่อุณหภูมิภายในชิ้นของพายชั้นสูงขึ้น เมื่อเกิดความร้อนความชื้นที่มีอยู่ในชั้นของโดและชั้นของมาการีนจะเริ่มดันขึ้นมา ชั้นของโดและมาการีนนับร้อยๆ ชั้นจะโก่งตัวขึ้นมาทำให้เกิดเป็นชั้นบางๆ ขึ้น (จิตธนา และอรอนงค์, 2556)

สำหรับการวัดความชื้นของพายชั้นทำการทดลองโดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การหาความชื้นเปลือกนอกและด้านใน พบว่าด้านในของพายชั้นมีความชื้นมากกว่าเปลือกนอก เนื่องจากความชื้นเปลือกนอกของพายชั้น

จะระเหยอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นชั้นหนาและแข็งเพิ่มขึ้น แต่ภายในยังคงมีแรงดันไอน้ำและความชื้นมากกว่าเปลือกนอก ซึ่งการที่ความชื้นเปลือกนอกลดลง แห้งและแข็งทำให้การระเหยของไอน้ำภายในสู่ภายนอกเป็นไปได้ยาก (Tiphaine, 2014) โดยทั่วไปค่าความชื้นของพาย มีค่าที่ร้อยละ 12-18 (Cauvain *et al*., 2010) และจากการทดลองพบว่าที่กำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ ระยะเวลา 150 วินาที นั้นระดับความชื้นของพายชั้นมีความเหมาะสมมากที่สุด (Figure 6)

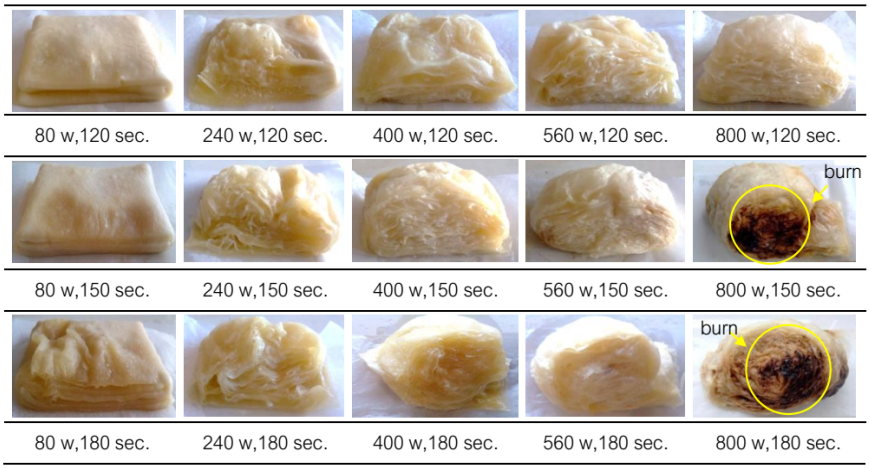


Figure 4 Appearance of puff pastry baked in the microwave at different power and times

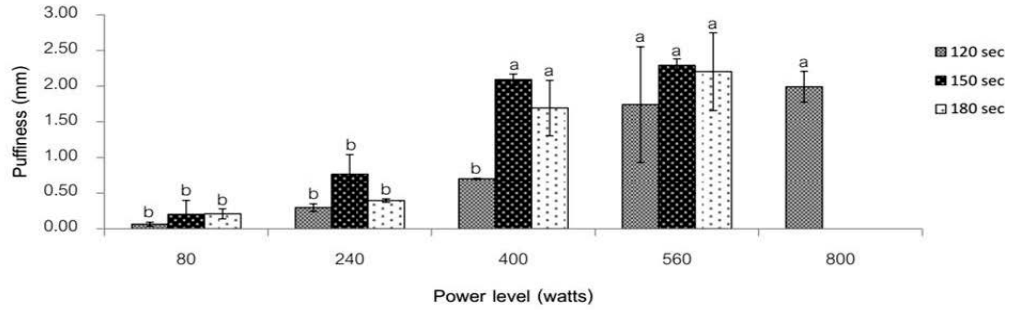
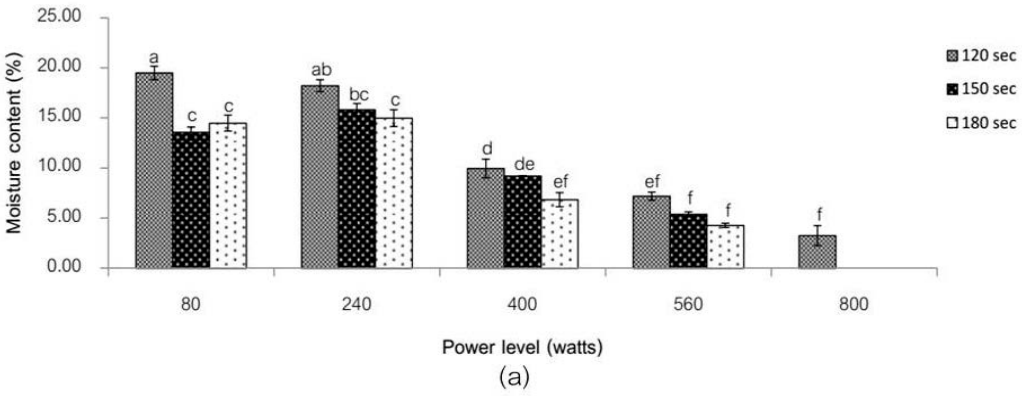


Figure 5 Puffiness of puff pastry baked in the microwave oven at different power and times



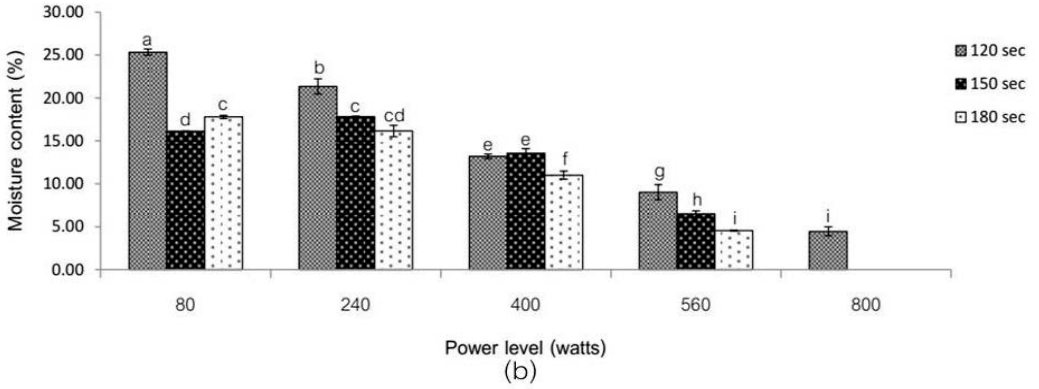


Figure 6 Moisture content of the puff pastry baked in the microwave oven at different power and times (a) at the outer crust surface and (b) at the inner core

ผลการศึกษาอิทธิพลซัสเซพเตอร์ร่วมกับบรรจุภัณฑ์กระดาษต่อคุณภาพของพายชั้นในตู้อบไมโครเวฟ

จากการวัดความชื้นของพายชั้น พบว่าการใช้บรรจุภัณฑ์ทำให้พายชั้นมีความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทั้งบริเวณเปลือกนอกและด้านใน นอกจากนี้พบว่าการใช้ซัสเซพเตอร์ในบรรจุภัณฑ์ยังทำให้ค่าความชื้นลดลงอีกเล็กน้อย เนื่องจากซัสเซพเตอร์มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ (นำไฟฟ้าสูง) ดูดซับพลังงานไว้ภายในและทำให้เกิดความร้อนขึ้น ส่งผ่านความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ส่งผลให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลง (Buffler, 1993) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Main *et al (*2007) เมื่อทดสอบหาความกรอบของพายชั้น พบว่า พายชั้นที่อบโดยใช้ซัสเซพเตอร์ให้ค่าความกรอบมากกว่าการอบโดยไม่ใช้ซัสเซพเตอร์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (Table 1) โดย Main *et al* (2007) กล่าวว่า ซัสเซพเตอร์ทำให้พายชั้นกรอบจากผิวด้านนอกสู่ด้านใน เนื่องจากความร้อนกระจายได้มากกว่าการอบโดยไม่ใช้ซัสเซพเตอร์

Table 1 Moisture content and crispness of puff pastry baked in the microwave oven applying paper packaging and susceptor

Susceptor application	Moisture content (%)		Crispness (N.sec)
	Crust	Crumb	
Control*	9.20±0.04[a]	13.57±0.52[a]	15.81±0.63[b]
Paper packaging	6.67±0.36[b]	5.55±0.45[b]	16.29±0.15[b]
Paper combined susceptor packaging	5.39±0.61[b]	3.24±0.74[b]	17.42±0.24[a]

*without packaging and susceptor

[a-b] Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

จากการทดลองวัดค่าสีของพายชั้น พบว่า การใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษเพียงอย่างเดียวในการอบขนมอาจทำให้การเปลี่ยนแปลงสีของอาหารไม่สม่ำเสมอโดยเฉพาะบริเวณมุมและด้านข้าง ซึ่งพายชั้นที่บรรจุในกล่องกระดาษขณะอบอาจเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าพายชั้นที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ แต่การใช้ซัสเซพเตอร์ในบรรจุภัณฑ์กระดาษจะทำให้การเกิดสีน้ำตาลบริเวณผิวด้านนอกของพายชั้นมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (Table 2 และ

Figure 8) ซึ่งน่าจะเป็นผลจากซัสเซพเตอร์ที่ติดบริเวณด้านบนของกล่อง ส่วนซัสเซพเตอร์ที่ติดบริเวณด้านล่างซึ่งสัมผัสขนมอบโดยตรงจะทำให้ขนมอบเปลี่ยนแปลงสีได้ แต่อาจจะไม่สามารถช่วยให้สีของขนมบริเวณห่างออกไปเปลี่ยนแปลงได้ ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Main *et al* (2007) และ İçöz *et al* (2004) ซึ่งศึกษาการใช้ซัสเซพเตอร์ในระบบไมโครเวฟ พบว่า การใช้ซัสเซพเตอร์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE) มากกว่าการไม่ใช้ซัสเซพเตอร์ โดยซัสเซพเตอร์เป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อาหารกรอบ และเกิดสีน้ำตาลได้ Albert *et al* (2009) กล่าวว่า ซัสเซพเตอร์เปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนผ่านไปยังผิวหน้าของอาหาร ทำให้พื้นผิวมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดสีน้ำตาลบนผิวของอาหาร

ทดสอบวัดอุณหภูมิของพายชั้น จำนวน 5 จุด พบว่า อุณหภูมิอยู่ในช่วง 85-170 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิจุดที่ 3 และ 4 (Figure 3a) มีค่าสูงกว่าจุดอื่นๆ และตำแหน่งที่อยู่ไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า (Figure 7) เนื่องจากการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการกระจายตัวได้ดีกว่าในตำแหน่งที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Pitchai *et al*., 2014; Chen *et al*., 2017) นอกจากนี้พบว่าการใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษและการใช้ซัสเซพเตอร์ในบรรจุภัณฑ์กระดาษส่งผลให้อุณหภูมิภายในของพายชั้นสูงกว่าการอบโดยไม่มีบรรจุภัณฑ์เมื่อใช้เวลาการอบเท่ากันแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนขณะอบ นอกจากนี้ยังพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ของพายชั้นในกรณีของชุดควบคุม กรณีการใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษ หรือกรณีการใช้ซัสเซพเตอร์ร่วมกับบรรจุภัณฑ์กระดาษ ซึ่งอุณหภูมิจะลดลงมากขึ้นในตำแหน่ง อยู่ไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Table 2 The color changes (ΔE) of microwave baked puff pastry baked by using different methods

Baked condition	Total color change (ΔE)				
	Top center	Top corner	Bottom center	Bottom corner	Average of (sided position)
Control*	24.61±0.43^{cA}	24.90±0.55^{aA}	14.69±0.93^{bC}	18.69±0.36^{aB}	22.92±0.61^{aA}
Paper packaging	28.56±0.13^{bA}	15.22±0.67^{bC}	14.70±0.28^{bC}	10.61±0.52^{cD}	19.18±0.82^{bB}
Paper combined susceptor packaging	34.65±0.37^{aA}	25.02±0.84^{aB}	35.47±0.45^{aA}	15.87±0.82^{bD}	19.56±0.41^{bC}

*without packaging and susceptor

$^{a-c}$ Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

$^{A-D}$ Means within the same row followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

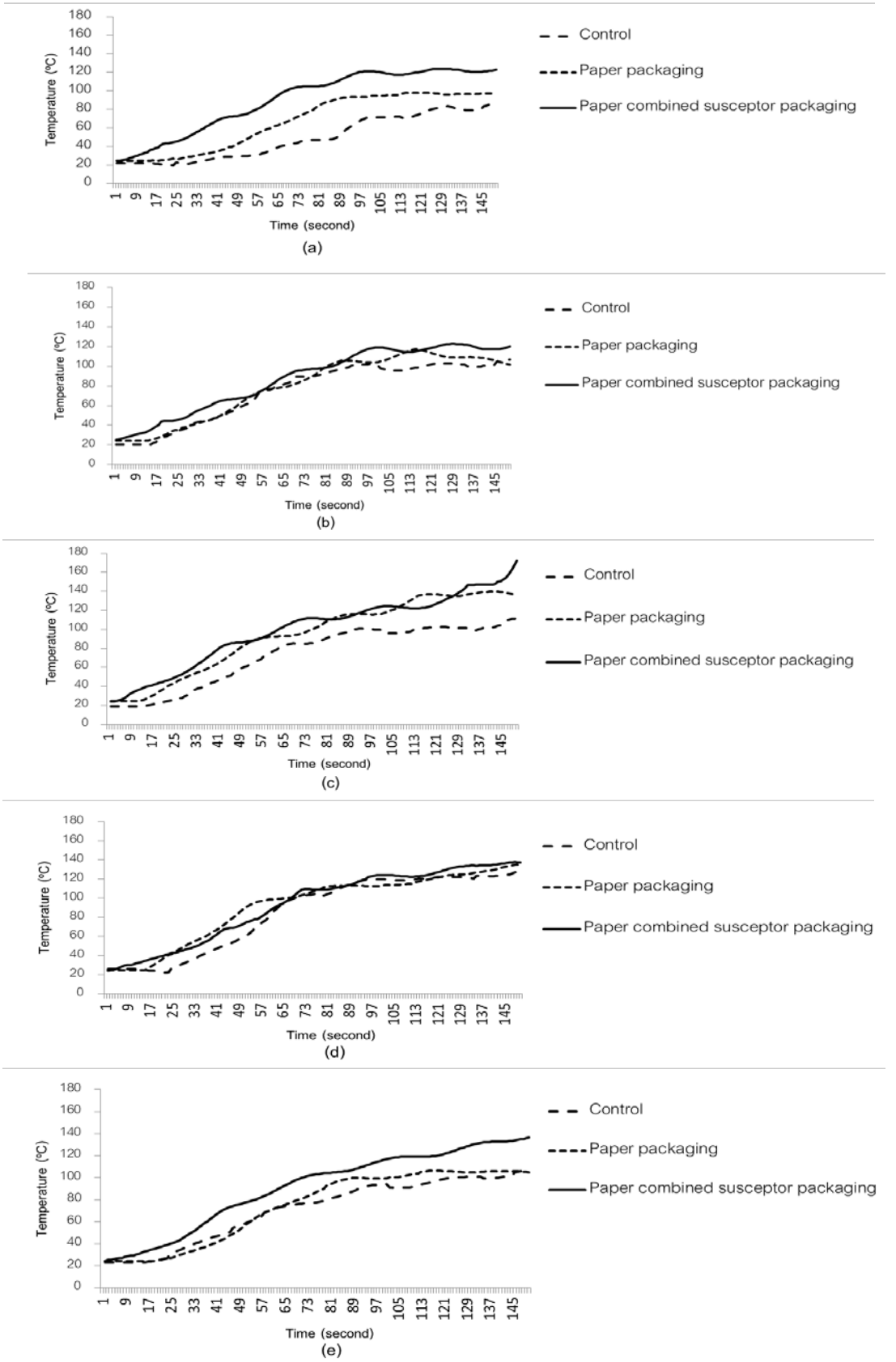


Figure 7 Temperature of puff pastry at different positions baked in the microwave oven: (a) point 1(CH1), (b) point 2 (CH2), (c) point 3 (CH3), (d) point 4 (CH4) and (e) point 5 (CH5) at 400 watt power, 150 seconds

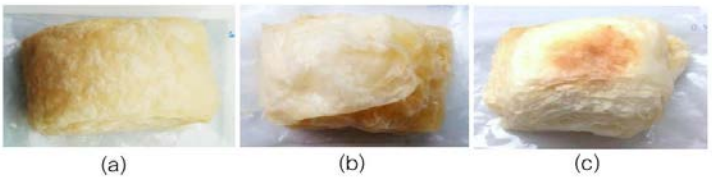


Figure 8 Color of puff pastry baked in (a) control (without packaging and susceptor), (b) paper packaging and (c) paper combined susceptor packaging

สรุป

จากการศึกษาระดับกำลังไฟฟ้า และระยะเวลาการอบต่อคุณภาพของพายชั้น พบว่า การขึ้นฟูของพายชั้นที่เหมาะสมคือที่ระดับกำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ ระยะเวลา 150 วินาที หลังอบความชื้นด้านในของพายชั้นมากกว่าเปลือกนอก และจากศึกษาอิทธิพลซัสเซพเตอร์ร่วมกับบรรจุภัณฑ์กระดาษต่อคุณภาพของพายชั้น พบว่าการใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษและการใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษร่วมกับซัสเซพเตอร์นั้นทำให้อุณหภูมิภายในของพายชั้นในสูงกว่าการไม่มีบรรจุภัณฑ์และพายชั้นมีความกรอบมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การใช้ซัสเซพเตอร์ติดบริเวณด้านบนของบรรจุภัณฑ์กระดาษช่วยให้อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและเกิดการเปลี่ยนแปลงสีบริเวณผิวมากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษเพียงอย่างเดียวอาจทำให้ขนมอบเปลี่ยนแปลงสีบริเวณมุมและด้านข้างลดลง ดังนั้นการใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษร่วมกับซัสเซพเตอร์จึงมีแนวโน้มที่จะสามารถใช้เพื่อเพิ่มความกรอบและเพิ่มสีน้ำตาลให้กับขนมอบได้ โดยตำแหน่งของการติดซัสเซพเตอร์นั้นควรอยู่ด้านบนของบรรจุภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

จิตธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล. 2556. **เบเกอรีเทคโนโลยีเบื้องต้น**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Albert, Á., P. Varela, A. Salvador and S. M. Fiszman. 2009. Improvement of crunchiness of battered fish nuggets. **European Food Research and Technology** 228: 923–930.

AOAC, 2000, **Official Methods of Analysis**, 17th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.

Buffler, C. R. 1993. **Microwave Cooking and Processing : Engineering Fundamental for the Food Scientist**. Van Nostrand Reinheld, New York.

Chen, F., Warning, A. D. Datta, A. K. and Chen, X. 2017. Susceptors in microwave cavity heating: Modeling and experimentation with a frozen pie. **Journal of Food Engineering** 195:191-205.

Fakhouri, M.O. and H. S. Ramaswamy. 1993. Temperature uniformity of microwave heated foods as influenced by product type and composition. **Food Research International** 26: 89-95.

Houšová, J. and K. Hoke. 2002. Temperature profiles in dough products during microwave heating with susceptors. **Czech Journal of Food Sciences** 20: 151–160.

İçöz, D., G. Sumnu and S. Sahin. 2004. Color and Texture Development During Microwave and Conventional Baking of Breads. **International Journal of Food Properties** 7: 201–213.

Jiamjariyatam, R., V. Kongpensook and P. Pradipasena. 2016. Prediction models for textural properties of puffed rice starch product by relative crystallinity. **Journal of Food Quality** 39: 445-455.

Lohoff, A. 2011. **Design and Development of Microwave Package for Company XYZ**. M.S. Thesis, University of Wisconsin-Stout.

Lubuza, T and J. Meister. 1992. An alternate method for measuring the heating potential of microwave susceptor films. **Microwave Power and Electromagnetic Energy** 27: 205-208.

Main, M.N., R.A. Rahman and C. Ilicali. 2007. Susceptor packaging material for baking flaky pastry dough (puff pastry) in microwave oven. **World Engineering Congress 2007, Penang, Malaysia, 5 – 9 August 2007**: 31-39.

Okeke, C., A. E. Abioye and Y. Omosun. 2014. Microwave Heating Applications in Food Processing. **IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering** 9 (4): 29-34.

Pitchai, K., S. Brahma, S. Birla, D. Jones and J. Subbiah. 2011. Effect of Location of Small Loads on Heating Rate and Uniformity in Domestic Microwave Ovens. **45th Annual Microwave Power Symposium (IMPI 45)**: 29-41.

Pitchai, K., J. Chen, S. Birla, R. Gonzalez, D. Jones and J. Subbiah. 2014. A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: Development and validation. **Journal of Food Engineering** 128: 60-71.

Salvador, A., P. Varela, T. Sanz and S. M. Fiszman. 2009. Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture and acoustic measurements, and sensory analysis. **LWT - Food Science and Technology** 42: 763-767.

Tiphaine, L. Baking, pp. 336-354 *In* Zhou, W. **Bakery products Science and Technology**. 2nd ed. John wiley & Sons Ltd., USA.

Vadivambal, R. and D. S. Jayas. 2010. D. S. Non-uniform Temperature Distribution During Microwave Heating of Food Materials - A Review. **Food and Bioprocess Technology** 3:161–171.

Effect of 4-hexylresocinol and Ascorbic Acid on Enzymatic Browning Reduction and Vitamin C Content of Fresh-cut Green Apple

Siya Hun[1*], Nutthachai Pongprasert[1, 2], Pongphen Jitareerat[1, 2], Panida Boonyarithongchai[1, 2] and Varit Srilaong[1, 2]

ABSTRACT

Browning of cut surface is the major problem of fresh-cut green apple. This research aims to study the effect of 4-hexylresocinol (4-HR) and ascorbic acid (AsA) on reducing browning and maintain the quality of fresh-cut green apple. Apple fruits (Granny Smith) were washed with 200 ppm sodium chlorite (NaOCl) for 3 min. Then washed apple fruits were cut into small pieces (6 pieces/fruit). Cut apples were dipped for 1 min in 0.0125% (w/v) 4-HR and 0.5% (w/v) AsA or 0.0125% 4-HR combined with 0.5% AsA. After dipping, apples were packed in plastic tray and sealed with polypropylene (PP) film and stored at 4°C for 8 days. The result showed that the combination of 4-HR (0.0125%, w/v) and AsA (0.5%, w/v) was the most effective in reducing browning of cut surface. Fresh-cut apples dipped in 4-HR combined with AsA treatment showed lower browning score and higher L* value when compared to control, 4-HR, and AsA samples. Apple pieces dipped in 4-HR combined with AsA treatment had higher vitamin C than control and 4-HR samples. The result indicated that the combination of 4-HR and AsA was effective in reducing browning and maintaining the vitamin C content of fresh-cut green apple.

Key Words: fresh-cut, apple, 4-hexylresocinol, ascorbic acid, browning, polyphenol oxidase, peroxidase, polypropylene

* Corresponding author; e-mail address: **cambo_siya@yahoo.com**

[1]Division of Postharvest Technology, School of Bioresource and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi

[2]Postharvest Technology Innovation Center, Office of the Higher Education Commission, Bangkok 10400, Thailand.

INTRODUCTION

Fresh-cut green apples are popular from consumer's consumption. Therefore, fresh-cut apples are faced many problems with shelf-life cause by the main browning appearance, and vitamin C decrease during storage. An appearance of the color changes on fresh-cut green apple is the main factor to minimize the storage shelf-life (Yan *et al*., 2017). The browning of cutting surface of fresh-cut apples is considering of quality loss and appearance caused by enzymatic browning. Oxidation of endogenous polyphenolic compounds containing an o-dihydroxyl group to co-relationship with o-quinones in the presence of oxygen and the reaction is catalyzed by an oxidizing polyphenol oxidase (PPO) enzyme (Garcia *et al*., 2002). Peroxidase (POD) is another important oxidative enzyme besides PPO. It is performing single electron oxidation of phenolic compounds in presence of hydrogen peroxide from the oxidation. Some phenolics catalyzed by PPO can induce synergistic action between PPO and POD, which involved of POD in browning processes (He and Luo, 2007).

4-hexylresocinol (4-HR) is an anti-browning, an ingredient in oral and sanitizing agents. It is an important for prevention in burn wound and proposed for prevention of black spot (Frankos *et al*., 1991). Furthermore, Alvarez-Parrilla (2007) reported that 4-HR can inhibit enzymatic browning of fresh-cut apples, avocados and potatoes in food industry (Ahn *et al*., 2016).

Ascorbic acid (AsA) or vitamin C is an antioxidant that plays a great role in removing reactive oxygen species (ROS). Moreover, it was also proved that AsA can prevent browning surface of fresh-cut fruits and vegetables (Fang *et al*., 2017). Cutting induces wounding of the plant cell wall and thus stimulates oxidative stress in fresh cuts, consequently leading cell damage or cell death. Jang and Moon (2011) reported that ascorbic acid can reduce *o*-quinones produced by PPO oxidation catalyzed of polyphenols back to dihydroxyl polyphenols. Cocetta (2014) suggested that 1-3% ascorbic acid was effective for prevention of browning of fresh-cut apple. The aim of the study was to study the effect of 4-hexylresocinol and ascorbic acid in reducing browning and maintain vitamin C content of fresh-cut green apple.

MATERIALS AND METHODS

1. Fruit materials and experimental design

Granny Smith apples (*Malus domestica* Borkh) were purchased from commercial market and delivered to Postharvest laboratory, King Mongkut's University and Technology Thonburi, Bangkok, Thailand. Apple fruits were selected on the basis of color, size and absence of pest infection. Green apple fruits were washed with 200 ppm sodium chlorite (NaOCl) for 3 min before processing. Apples were cut into 6 pieces per fruit, dipped in 0.0125% (w/v) 4-HR, 0.5% (w/v) AsA, and combined 0.0125% (w/v) 4-HR with 0.5% (w/v) AsA for 1 min. Green apple pieces were packed in plastic white tray (12 cm x 7 cm x 6 cm) sealed with polypropylene (PP) film and stored at 4 ^{o}C for 8 days. Each tray contains 8 pieces of fresh cut green apples which is considered as one replicate. The experiment

had 4 replicates per treatment. Results were analyzed by one-way analysis of variance (ANOVA) while Duncan's multiple range tests were used to compare means and differences at $P < 0.05$.

2. Browning score and color changes

The color of apple pieces was measured on cut surface by using a colorimeter CR-400 Minolta Chroma Meter. The color changes of fresh-cut green apples were focused on only the L* value. The L* value is necessary to monitor lightness or darkness of fresh-cut produce. L* value of apple pieces were recorded every two days of storage.

Browning score of fresh-cut green apples was described by 10 people. The evaluated score was using a scale of 1-5, where 1 = none, 2 = slight (up to 5% surface affected), 3 = moderate (5-20% surface affected), 4 = moderately severe (20-50% surface affected) and 5 = extreme (> 50% surface affected) for individual pieces (Zahra *et al.,* 2013).

3. Vitamin C content

Ascorbic acid was extracted by homogenizing 5 g of apples tissue in 5% metaphosphoric acid. The homogenized sample the filtered through Whatman no. 1 filter paper. 0.4 mL of supernatant added with 0.2 mL 0f 0.02% indophenol then added 0.4 mL of 2% thiourea with 0.2 mL of 2% 2,4-Dinitrophenl Hydrazine (DNP). Incubated at 50^{o}C for an hour then added 1 mL of 85% sulfuric acid. Ascorbic acid content was determined by spectrophotometer an absorbance at 540 nm modified by (Roe *et al*., 1948).

4. Polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) enzyme activity

The polyphenol oxidase(PPO) enzyme activity was determined by method modified based on Jang and Moon (2011). Green apple tissue was homogenized in 20 mL of 0.005 mol/L sodium phosphate buffer (pH 7.0) consisted 0.5g polyvinylpyrrolidone (PVPP). The extracted solution was filtered through Whatman no. 1 filter paper and centrifuged at 3,000 x g for 15 min at 4 ^{o}C. 0.5 mL of supernatant was mixed with 1.5 mL of sodium phosphate buffer (pH 7.0) and 1 mL of 23N catechol. Finally, the activity of PPO enzyme was measured by spectrophotometer (410 nm). The activity is expressed as units per milligram of protein, one unit presents the amount of enzyme necessary in 0.001/min.

The peroxidase (POD) was extracted by a modified method based on Chen Zhao (2010). POD was extracted from 5 g of green apple tissue by homogenizing consisted of a 20 ml of 0.05 mol/L sodium phosphate buffer (pH 7.0) with 0.5g polyvinylpyrrolidone (PVPP). The homogenate was centrifuged at 3000x g at 4^{o}C for 15 min. The supernatants were collected for the POD activity assay. POD activity was assayed spectrophotometrically in absorbance at 470 nm. The reaction cuvette contained 0.25 mL substrate solution and 1.75 mL of sodium phosphate buffer (pH 7.0) with 1 mL 1% guaiacol. The activity is expressed as units per milligram of protein, one unit presents the amount of enzyme necessary in 0.01/min.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Browning score and Color change

L* values have been widely used to indicate the lightness/darkness of the cut surface of apple pieces with browning (Castaner *et al*,.1999). At day 4 of storage, the L* value was significantly declined in the control samples (Figure 1b). The combination treatment containing 0.0125% (w/v) 4-HR with 0.5% (w/v) AsA showed the stable L* values through 8-day-storage. It was significant different ($p \leq 0.01$) comparing to control samples.

Browning score obtained from combination treatment condition showed the least browning (Figure 1a). Mixing 0.0125% (4-HR) with 0.5% (AsA) exhibited high activity to decrease browning that was caused by PPO and POD enzymes. Meanwhile, this mixture also increased antioxidant capacity associated with PAL activity (Malgorzata and Michal, 2018).

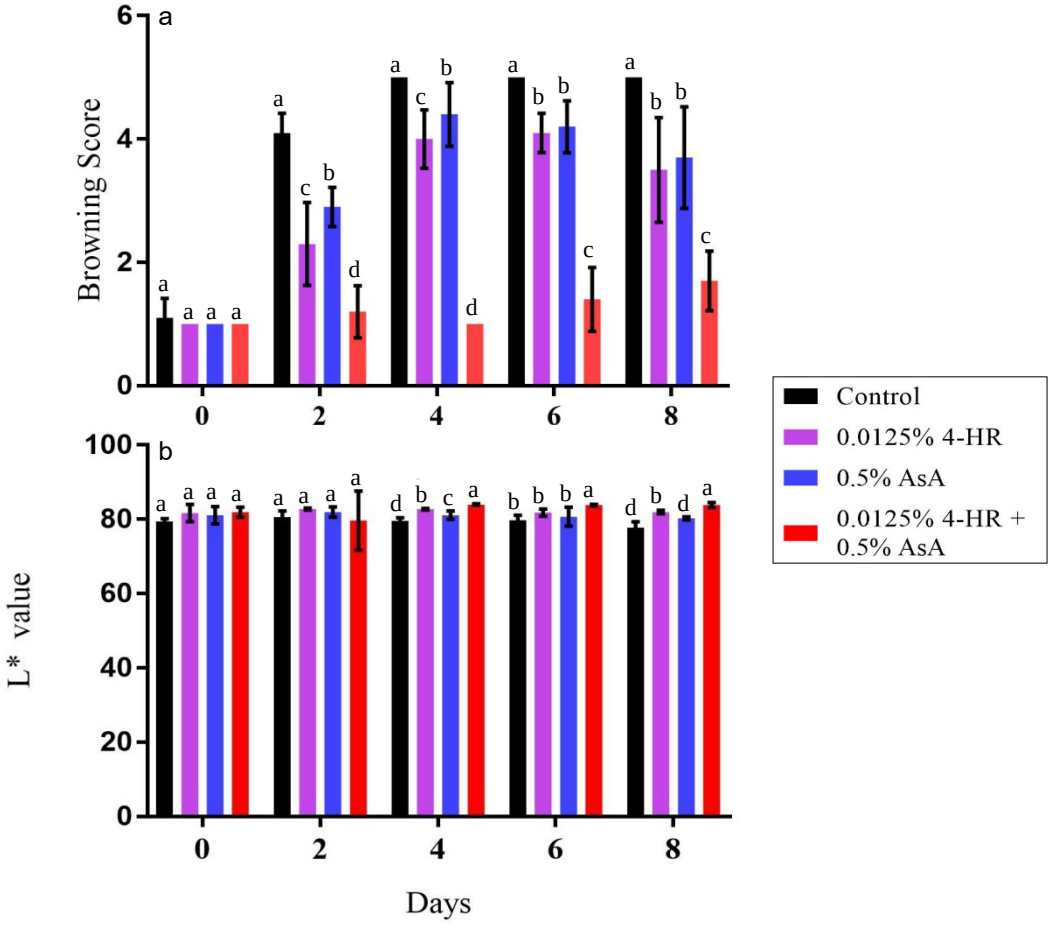


Figure 1 Effect of 4-HR and AsA treatments on the (a) browning score color parameter and (b) L* value of the cut surface of Granny Smith apple slices during storage 8 days at 4°C. Data are the means ± standard deviations of 4 replications.

The combination of 0.0125% 4-HR with 0.5% AsA was the most efficient anti-browning compound in preventing browning of fresh-cut green apple. The samples treated with AsA combined

with 4-HR obtained the lowest appearance score and highest in L* value during cold storage. The L* value was associated with the development of browning. Gorny *et al*., (2002) stated that the increase of antioxidant capacity positively correlated with PPO inhibition. Both of them may prevent cells membrane breakdown, leading to substrates reducing. Thus, fresh-cut green apple color was preserved.

2. Effect of 4-HR and AsA on polyphenol oxidase and peroxidase

The polyphenol oxidase (PPO) enzyme of the treated fresh-cut green apples is presented in Figure 2a. PPO activity is generally considered as the first step in enzymatic browning caused from PPO enzyme which catalyzes monophenols to be *0*-phenols (He and Luo, 2007). Activity of PPO showed a significant difference at $p \leq 0.05$. It showed lower PPO activity in combined with 4-HR and AsA treated samples on day 2 of storage.

Although it has been recognized that PPO is the main enzyme related to enzymatic browning on fresh-cut green apples. It is necessary to study the changes in peroxidase (POD) enzyme in fresh-cut products. The changes of POD enzyme activity in fresh-cut green apples were shown in Figure 2b. POD was significantly different and its highest activity was found at the eighth day of storage in control samples. On the other hand, the combination of 0.0125% (w/v) 4-HR with 0.5% (w/v) AsA treated samples gave significantly low POD activity when compared to the control after day 4 of storage at 4°C.

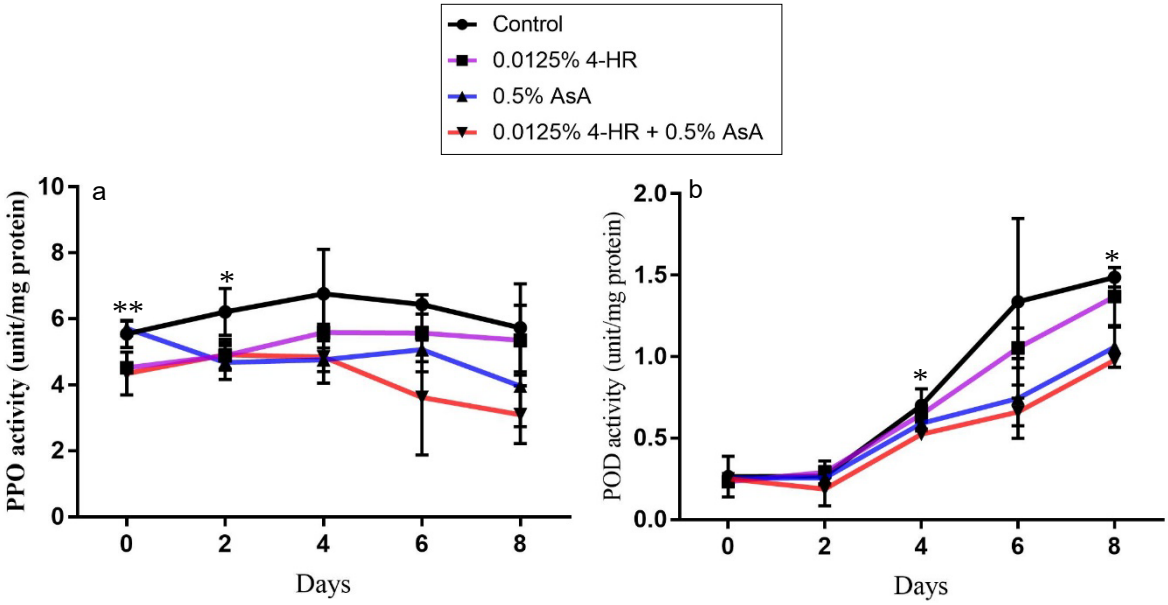


Figure 2 (a) Polyphenol oxidase activity and (b) peroxidase activity of fresh-cut green apples during storage 8 days at 4°C. Data are the means ± standard deviations of 4 replications. Asterisks indicate statistical differences between treatment (* $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$).

The combination of 0.0125% (w/v) 4-HR with 0.5% (w/v) AsA treatment effected on reducing the peroxidase (POD) activity in the fresh-cut green apple. The reduced POD activity in the fruits treated with AsA could be the result of a lower oxidative stress on the fruit surface due to the antioxidant ability of AsA. The combination of AsA with 4-HR treatment possibly inhibited the PPO and POD activities by enhanced antioxidant action. Several studies have suggested that the hyper-reactivity of enzymes, such as polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) often cause oxidation in fresh-cut fruits and vegetables. Therefore, the combination of 4-HR and AsA would seem to delay the development of surface browning of green apple slices through inhibition of PPO activity which leads to reduction in the oxidation of polyphenols (Malorzata *et al.*, 2017).

3. Vitamin C contents

Vitamin C (ascorbic acid) is the most important nutrient in fruits and it has mainly biological activities in human body. Changes in vitamin C content of fresh-cut green apples are shown in Figure 3. Vitamin C content of green apple pieces was higher in 4-HR combined with AsA samples at day 0 to day 8 of storage. The ascorbic acid (AsA) and combined treatments showed 17.352 mg vitamin C/100g fresh weight (FW) and 19.529 mg/100mg FW, respectively, at day 6 of storage. While, in control remained only 2.623 mg vitamin C/100g FW at the same storage after day 6. The inhibition of vitamin C loss in the treated samples when compared to control was significantly different ($p \leq 0.01$). All the findings in terms of vitamin C content showed that both AsA and combined of 4-HR with AsA treatments had the ability to maintain the nutritional value of fresh-cut green apple pieces. The increase in vitamin C in AsA and combined 4-HR with AsA treated green apple slices may be due to the inhibitory roles of these compounds on enzymes activity such as ascorbate peroxidase (APX) and ascorbate oxidase (AO), in fresh-cut apple (Perez *et al.*, 1999).

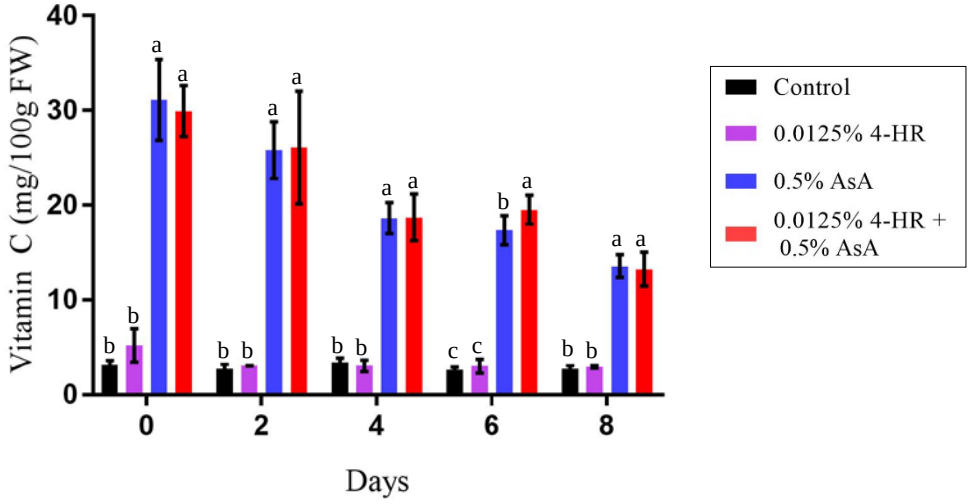


Figure 3 Effect of 4-HR and AsA treatments on vitamin C of fresh-cut green apple during storage 8 days at 4 °C. Data shown are means ± standard deviations of 4 replications.

CONCLUSION

This result suggests that the combination of 4-hexylresocinal and ascorbic acid was effective in reducing browning and maintaining vitamin C contents of fresh-cut green apple. Therefore, the combination of 0.0125% (w/v) 4-hexylresocinol with 0.5% (w/v) ascorbic acid caused the lowest levels of browning in fresh-cut green apples during storage at 4°C for 8 days. This technique can be applied in fresh-cut apple industry.

ACKNOWLEDGEMENT

We thank the King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) and Thailand Scholarship for providing the master degree in Postharvest Technology scholarship.

REFERENCES

Ahn, J., S.G. Kim, M.K. Kim, D.W. Kim, J.H. Lee, H. Seok and J.Y. Choi. 2016. Topical delivery of 4-hexylresorcinol promotes wound healing via tumor necrosis factor-α suppression. **Journal of The International Society for Burn Injuries**. 42: 1534-1541.

Alvarez-Parrilla, E., L. De La Rosa, J. Rodrigo-García, R. Escobedo-González, G. Mercado-Mercado, E. Moyers-Montoya and G. González-Aguilar. 2007. Dual effect of β-cyclodextrin (β-CD) on the inhibition of apple polyphenol oxidase by 4-hexylresorcinol (HR) and methyl jasmonate (MJ). **Food Chemistry**. 101: 1346-1356.

Castaner, M., M. I. Gil, M. V. Ruiz and F. Artes. 1999. Browning susceptibility of minimally processed Baby and Romaine lettuces. **European Food Research and Technology**. 209: 52-56.

Chen, Z., C. Zhu, Y. Zhang, D. Niu and J. Du. 2010. Effects of aqueous chlorine dioxide treatment on enzymatic browning and shelf-life of fresh-cut asparagus lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Postharvest Biology and Technology**. 58: 232-238.

Cocetta, G., V. Baldassarre, A. Spinardi and A. Ferrante. 2014. Effect of cutting on ascorbic acid oxidation and recycling in fresh-cut baby spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaves. **Postharvest Biology and Technology**. 88: 8-16.

Fang, T., Q. Zhen, L. Liao, A. Owiti, L. Zhao, S. S Korban and Y.Han. 2017. Variation of ascorbic acid concentration in fruits of cultivated and wild apples. **Food Chemistry**. 225: 132-137.

Frankos, V. H., D. F. Schmitt, L. C.Haws, A. J. McEvily, R. Iyengar, S. A. Miller and R. M. Sauer. 1991. Generally recognized as safe (GRAS) evaluation of 4-hexylresorcinol for use as a processing aid for prevention of melanosis in shrimp. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**. 14: 202-212.

Garcia, E and D. M. Barrett. 2002. Preservative treatments for fresh-cut fruits and vegetables. **Fresh-cut Fruits and Vegetables**. 267-304.

Gorny, J.R., B. Hess-Pierce, R.A. Cifuentes and A.A. Kader. 2002. Quality changes in fresh cut pear slices as affected by controlled atmospheres and chemical preservatives. **Postharvest Biology and Technology**. 24: 271–278.

He, Q. and Y. Luo. 2007. Enzymatic browning and its control in fresh-cut produce. **Stewart Postharvest Review**. 3: 1-7.

Jang, J.H. and K.D. Moon. 2011. Inhibition of polyphenol oxidase and peroxidase activities on fresh-cut apple by simultaneous treatment of ultrasound and ascorbic acid. **Food Chemistry**, 124: 444-449.

Perez-Gago, M.B., M. Serra and M.A. Del Rio. 2006. Colour change of fresh-cut apples coated with whey protein concentrate-based edible coatings. **Postharvest Biology and Technology**. 39: 84–92.

Perez, A.G., C. Sanz, J.J. Rios, R. Olias and J.M. Olias. 1999. Effects of ozone treatment on postharvest strawberry quality. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 47: 1652–1656.

Roe, J.H., B.M. Mary, M.J. Oestering and M.D. Charlotle.1948. The determination of diketo-L-gulonic acid, dehydroascorbic acid and L-ascorbic acid in the same tissue extract by 2,.4-dinitrophenyl hydrazine method. **Journal of Biological Chemistry**. 174: 201-208.

Sikora, M. and M. Swieca. 2018. Effect of ascorbic acid postharvest treatment on enzymatic browning, phenolics and antioxidant capacity of stored mung bean sprouts. **Food Chemistry**. 239: 1160-1166.

Yan, S., Y. Luo, B. Zhou and D.T. Ingram. 2017. Dual effectiveness of ascorbic acid and ethanol combined treatment to inhibit browning and inactivate pathogens on fresh-cut apples. **LWT-Food Science and Technology**. 80: 311-320.

Zahra, J., G. Mahmood and Z. Somaye. 2013. A comparison of heat treatment and ascorbic acid on controlling enzymatic browning of fresh-cuts apple fruit. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**. 5: 186-193.

การพัฒนาชาลำไยผสมสมุนไพรรวม 9 ชนิดแบบซองชง

Development of Longan Tea Bag Mixed with 9 Herbs

พรรณนิภา ศิริพันธ์[1*] อนุวัตร แจ้งชัด[1] และ กมลวรรณ แจ้งชัด[1]

Phannipha Siriphunt[1*], Anuvat Jangchud[1] and Kamolwan Jangchud[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาชาลำไยผสมสมุนไพรรวม 9 ชนิดแบบซองชง โดยพบว่าเมล็ดลำไยมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากกว่าเนื้อลำไย เมื่อศึกษาอัตราส่วนระหว่างเนื้อลำไยและเมล็ดลำไยพบว่าน้ำชาสูตรที่ประกอบด้วยเนื้อลำไยร้อยละ 50 และเมล็ดลำไยร้อยละ 50 โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด และจากผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างลำไยต่อสมุนไพรพบว่าสูตรที่เหมาะสมที่สุดประกอบด้วยลำไยร้อยละ 60 และสมุนไพรร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแต่ทั้งนี้ยังพบว่าสูตรดังกล่าวควรที่จะปรับปรุงคุณลักษณะด้านรสหวานและกลิ่นรสลำไยให้เพิ่มมากขึ้น จึงศึกษาปริมาณหญ้าหวานที่เหมาะสม โดยพบว่าการเติมหญ้าหวานร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่ให้รสหวานพอดีที่สุด ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ มีคุณภาพทางจุลชีววิทยาตามเกณฑ์ที่ มผช. กำหนด และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคโดยส่วนใหญ่ (90.1%) ซึ่งให้คะแนนความชอบผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง (6-7) จากสเกลความชอบมากที่สุด 9

ABSTRACT

This research aims to develop the longan tea bag mixed with 9 herbs. It was found that antioxidant activity of longan seed was more than that of longan flesh. Ratio of longan flesh and seed was studied, the result from sensory evaluation indicated that 50% (w/w) flesh and 50%(w/w) seed was the optimal ratio. Furthermore, result on studying ratio of longan and herbs showed that the optimal formula was 60% (w/w) longan and 40% (w/w) herbs. However, this formula should be further improved in sweetness and longan flavor. Stevia adding was studied, the result revealed that 3% (w/w) of stevia adding was the optimum sweetness. The developed product had antioxidant activity. The microbiological qualities met Thai Community Product Standard. Moreover, this product was accepted by 90.1% consumer who rated the liking score for this product in ranging 6-7 from 9 points hedonic scale.

Key Words: product development, longan, longan tea

* Corresponding author; email address: **phannipha.sai@gmail.com**

[1] ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ลำไย (Longan) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Dimocarpus* longan Lour. จัดอยู่ในวงศ์ Sapindaceae ลำไยจัดเป็นไม้ผลที่ถือเป็นพืชเศรษฐกิจสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรทางภาคเหนือเป็นอย่างมาก โดยเนื้อลำไยนอกจากจะอุดมไปด้วยคาร์โบไฮเดรตแล้ว ยังประกอบไปด้วยโปรตีน เส้นใย ไขมัน วิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญต่อร่างกายอีกหลายชนิด นอกจากนี้ลำไยยังประกอบด้วยสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ในกลุ่มสารประกอบพอลิฟีนอลิก ได้แก่ กรดแกลลิก (Gallic acid) สารคอริลาจิน (Corilagin) และกรดเอลลาจิก (Ellagic acid) ซึ่งสารทั้ง 3 ชนิดพบในส่วนของเมล็ดลำไยมากกว่าในส่วนของเปลือกและเนื้อลำไย (Rangkadilok *et al.*, 2005) โดยกรดเอลลาจิกนอกจากจะมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระแล้วยังมีคุณสมบัติในการต้านฤทธิ์ของสารก่อมะเร็ง ยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็ง และยังช่วยเสริมฤทธิ์ของยาที่ใช้รักษาโรคมะเร็งได้อีกด้วย (วรางคณา, 2553)

จากองค์ประกอบที่สำคัญของลำไย ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการแปรรูปเนื้อลำไยและเมล็ดลำไยให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นการนำลำไยมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชาลำไยผสมสมุนไพรรวม 9 ชนิดแบบซองชง โดยใช้วัตถุดิบหลักเป็นเนื้อลำไยและเมล็ดลำไยอบแห้ง อีกทั้งยังมีส่วนประกอบของสมุนไพรรวม 9 ชนิด ปรับแต่งรสชาติด้วยหญ้าหวาน ซึ่งสมุนไพรทุกชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นพืชที่ได้รับการอนุญาตจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (กองควบคุมอาหาร, 2549)

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

ผงเนื้อลำไยอบแห้ง ผงเมล็ดลำไยอบแห้ง (*Dimocarpus longan*) ผงสมุนไพรรวม 9 ชนิด และผงหญ้าหวาน ได้รับจากบริษัท สวนกนกอัณณ์ จำกัด

การศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผงเนื้อลำไยและเมล็ดลำไย

ศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผงเนื้อลำไยและเมล็ดลำไย โดยวิเคราะห์ค่า Water activity (a_w) ค่าสี (L*, a* และ b*) ปริมาณความชื้น (AOAC, 2012) และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากผงเนื้อลำไยและเมล็ดลำไยที่สกัดด้วยเมทานอลอัตราส่วน 1:40 (w/v) วิเคราะห์ด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH assay) ซึ่งดัดแปลงวิธีของ Brand-Williams *et al*. (1995) และวิธี ABTS cation radical scavenging assay (ABTS assay) โดยดัดแปลงวิธี Wojdylo *et al*. (2007) รายงานผลเป็นมิลลิโมลสมมูลของโทรลอกซ์ต่อตัวอย่าง 100 กรัมน้ำหนักแห้ง (mmol Trolox/100 g dry weight) วิธี Ferric Reducing Ability Power (FRAP) โดยดัดแปลงวิธีของ Wojdylo *et al*. (2007) และ Deetae *et al*. (2012) รายงานผลเป็นมิลลิโมลสมมูลของเฟอร์รัสซัลเฟตต่อตัวอย่าง 100 กรัม น้ำหนักแห้ง (mg $FeSO_4$/100 g dry weight) และวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteau โดยดัดแปลงวิธีของ Deetae *et al*. (2012) รายงานผลเป็นกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อตัวอย่าง 100 กรัม น้ำหนักแห้ง (g GAE/100 g dry weight)

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างผงเนื้อลำไยต่อผงเมล็ดลำไยที่เหมาะสม

ศึกษาอัตราส่วนระหว่างผงเนื้อลำไยต่อผงเมล็ดลำไยที่เหมาะสม โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างเนื้อและเมล็ดลำไย 3 ระดับคือ 25:75, 50:50 และ 75:25 บรรจุในซองเยื่อกระดาษปริมาณ 2 กรัม ชงด้วยน้ำร้อน (อุณหภูมิ 80°C) 80 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 นาที ทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของชาทั้ง 3 สูตร

ทางด้านลักษณะปรากฏ ความข่น สี กลิ่นลำไย รสหวาน รสขม กลิ่นรสโดยรวม และความชอบโดยรวม ด้วย 9-Point Hedonic Scale โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างลำไยและสมุนไพรรวมที่เหมาะสม

ศึกษาอัตราส่วนระหว่างลำไยต่อสมุนไพรรวม 4 ระดับคือ 25:75, 50:50, 60:40 และ 75:25 บรรจุในซองเยื่อกระดาษปริมาณ 2 กรัม ชงด้วยน้ำร้อน 80 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 นาที ทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นโดยรวม รสหวาน กลิ่นรสลำไย กลิ่นรสสมุนไพร กลิ่นรสโดยรวม รสชาติโดยรวม และความชอบโดยรวม ด้วย 9-Point Hedonic Scale และทดสอบความพอดีด้านสีน้ำตาล รสหวาน กลิ่นรสลำไย และกลิ่นรสสมุนไพรด้วย Just about right scale โดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 30 คน

การศึกษาปริมาณหญ้าหวานที่เหมาะสม

ศึกษาปริมาณหญ้าหวาน 3 ระดับ คือ 0.00, 0.05 และ 0.10 กรัมต่อชาลำไยผสมสมุนไพร 3 กรัม ทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นโดยรวม รสหวาน กลิ่นรสลำไย กลิ่นรสสมุนไพร กลิ่นรสโดยรวม รสชาติโดยรวม และความชอบโดยรวมด้วย 9-Point Hedonic Scale และทดสอบความพอดีด้านรสหวาน กลิ่นรสลำไย และกลิ่นรสสมุนไพรด้วย Just about right scale โดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 30 คน

การศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่พัฒนาได้ทางด้านเคมีและจุลชีววิทยา

วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่พัฒนาได้ทางเคมีโดยการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay และวิธี ABTS assay รายงานผลในหน่วย mmol Trolox/100 g dry weight วิธี Ferric Reducing Ability Power (FRAP) รายงานผลในหน่วย mg $FeSO_4$/100 g dry weight และวิเคราะห์สารประกอบฟินอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteau รายงานผลในหน่วย g GAE/100 g dry weight สำหรับคุณภาพทางจุลชีววิทยา ทำการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด คอลิฟอร์ม ยีสต์และรา เทียบเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลิตภัณฑ์สมุนไพรรวมแห้งชงดื่ม (มผช. 996/2556)

การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์

ทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้ ด้วยการให้ผู้บริโภครับประทานตัวอย่างผลิตภัณฑ์พร้อมทั้งตอบแบบสอบถาม 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลทางประชากรศาสตร์ ส่วนที่ 2 ข้อมูลด้านพฤติกรรมการบริโภคผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชาสมุนไพรและส่วนที่ 3 ข้อมูลด้านความชอบและการยอมรับผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพร โดยทดสอบกับผู้บริโภคจำนวน 100 คน

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อคสมบูรณ์ (Randomized complete block design, RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA (analysis of variance) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (SPSS for Windows version 12) สำหรับผลการทดสอบ Just about right scale จะนำข้อมูลที่ได้มาหาความถี่ คำนวณค่าเป็นร้อยละและคำนวณหาค่า net effect โดยกำหนดระดับความพอดีที่ 70% และ net effect $\leq$ 20

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผงเนื้อลำไยและเมล็ดลำไย

จากการศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผงเนื้อลำไยและเมล็ดลำไย ผลดังตารางที่ 1 พบว่าผงเนื้อลำไยอบแห้งมีค่า a_w และปริมาณความชื้นสูงกว่าผงเมล็ดลำไย ในขณะที่คุณภาพทางด้านอื่นๆ โดยเฉพาะฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของผงเมล็ดลำไยที่มีค่ามากกว่าผงเนื้อลำไยอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rangkadilok *et al.* (2005) ที่รายงานว่าส่วนของเมล็ดลำไยพบกลุ่มสารประกอบพอลิฟีนอลิก ได้แก่ กรดแกลลิก (Gallic acid) สารคอริลาจิน (Corilagin) และกรดเอลลาจิก (Ellagic acid) มากกว่าส่วนของเนื้อและเปลือกลำไย

Table 1 Physical and Chemical qualities of longan flesh and longan seed

Qualities	Longan flesh	Longan Seed
Physical qualities		
Water activity (a_w)	0.47 ± 0.01[a]	0.41 ± 0.01[b]
Color		
L*	20.54 ± 0.17[b]	42.10 ± 0.42[a]
a*	6.51 ± 0.10[b]	7.88 ± 0.02[a]
b*	7.58 ± 0.32[b]	20.50 ± 0.14[a]
Chemical qualities		
%Moisture content (%MC)	7.65 ± 0.06[a]	6.10 ± 0.16[b]
Antioxidant activity		
by DPPH assay (mmol Trolox/100 g dry weight)	21.57 ± 1.88[b]	28.91 ± 1.70[a]
by ABTS assay (mmol Trolox/100 g dry weight)	22.27 ± 3.36[a]	26.59 ± 3.13[a]
by FRAP assay (mg $FeSO_4$/100 g dry weight)	25.60 ± 0.94[b]	40.34 ± 1.79[a]
Total phenolic content (g GAE/100 g dry weight)	1.07 ± 0.06[b]	1.40 ± 0.13[a]

[a,b] Different letters in the same row indicated significant difference ($p \leq 0.05$)

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างผงเนื้อลำไยต่อผงเมล็ดลำไยที่เหมาะสม

จากการศึกษาอัตราส่วนระหว่างเนื้อและเมล็ดลำไย 3 ระดับคือ 25:75, 50:50 และ 75:25 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านความชอบแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าคะแนนความชอบทางด้านกลิ่นลำไย รสหวาน กลิ่นรสโดยรวม และความชอบโดยรวมของน้ำชาลำไยทั้ง 3 ระดับอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีระดับนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาผลความชอบทางด้านอื่นๆ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ ความข่น สี และรสขม พบว่าน้ำชาที่มีอัตราส่วนระหว่างผงเนื้อลำไยต่อผงเมล็ดลำไย 50:50 และ 75:25 มีคะแนนเฉลี่ยมากกว่าที่ระดับ 25:75 เนื่องจากการมีผงเมล็ดลำไยมากขึ้นจะส่งผลให้น้ำชามีความข่นและรสขมมากขึ้นด้วย ดังนั้นจึงสามารถเลือกสูตร

ที่ระดับอัตราส่วน 50:50 หรือ 75:25 ไปศึกษาต่อในขั้นต่อไปได้ แต่เมื่อพิจารณาทางด้านคุณประโยชน์ที่คาดว่าจะได้ จึงตัดสินใจเลือกอัตราส่วน 50:50 เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด

Table 2 Mean scores for three longan tea formulations from sensory evaluation

Attributes	Mean ± SD		
	Ratio of longan flesh and seed		
	25:75	50:50	75:25
Appearance	6.2 ± 1.6[b]	6.8 ± 1.1[a]	6.7 ± 1.3[ab]
Turbidity	6.2 ± 1.4[b]	6.9 ± 1.2[a]	6.9 ± 1.3[a]
Color	5.9 ± 1.7[b]	6.7 ± 1.3[a]	6.1 ± 1.8[ab]
Longan aroma[ns]	5.4 ± 1.7	5.7 ± 1.5	5.9 ± 1.9
Sweetness[ns]	5.5 ± 1.5	5.6 ± 1.6	5.8 ± 1.7
Bitter	6.3 ± 1.4[b]	6.5 ± 1.3[ab]	6.7 ± 1.4[a]
Overall flavor[ns]	6.1 ± 1.5	6.4 ± 1.4	6.6 ± 1.3
Overall liking[ns]	6.1 ± 1.4	6.4 ± 1.3	6.3 ± 1.4

[a,b] Different letters in the same row indicated significant difference ($p \leq 0.05$)

ns: Not significant

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างลำไยและสมุนไพรรวมที่เหมาะสม

จากการศึกษาอัตราส่วนระหว่างลำไยและสมุนไพรของสูตรเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพร 4 ระดับคือ 25:75, 50:50, 60:40 และ 75:25 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านความชอบ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าอัตราส่วนระหว่างลำไยและสมุนไพรทั้ง 4 ระดับไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติทางด้านกลิ่นโดยรวม กลิ่นรสสมุนไพร กลิ่นรสโดยรวม และรสชาติโดยรวม เมื่อพิจารณาคะแนนทางด้านความชอบโดยรวมพบว่าที่อัตราส่วนระดับ 25:75, 60:40 และ 75:25 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ที่อัตราส่วนระดับ 60:40 มีคะแนนทางด้านอื่นๆ ค่อนข้างสูงกว่า จึงตัดสินใจว่าระดับดังกล่าวเป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด แต่จากผลทางด้านความพอดียังพบว่าเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพรสูตรดังกล่าวยังควรต้องปรับปรุงคุณลักษณะทางด้านรสหวานและกลิ่นลำไยให้เพิ่มขึ้น

การศึกษาปริมาณหญ้าหวานที่เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้มีการใช้หญ้าหวานเป็นส่วนประกอบ เนื่องจากหญ้าหวานเป็นพืชที่มีรสหวาน อีกทั้งยังได้รับการอนุญาตจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาให้เป็นพืชที่สามารถนำมาผลิตเป็นชาสมุนไพรได้ (กองควบคุมอาหาร, 2549) ดังนั้นจึงทำการศึกษาการแปรปริมาณหญ้าหวานที่ใช้ในสูตรเครื่องดื่มชาลำไยผสมสมุนไพร 3 ระดับ คือ 0.00, 0.05 และ 0.10 กรัมต่อชาลำไยผสมสมุนไพร 3 กรัม เมื่อนำมาทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านความชอบ ได้ผลดังตารางที่ 4 พบว่าผู้ทดสอบชอบชาลำไยผสมสมุนไพรสูตรที่มีการเติมหญ้าหวานด้านสีและกลิ่นรสลำไยมากกว่าสูตรที่ไม่มีการเติมหญ้าหวานอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนความชอบ

ด้านคุณลักษณะอื่นๆ ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการเติมหญ้าหวานทำให้สีน้ำชาเข้มขึ้นผู้ทดสอบจึงชอบมากกว่า และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบความพอดีจากการ พบว่าปริมาณหญ้าหวาน 0.10 กรัม ให้ผลพอดีทางด้านรสหวาน (net effect= 9.38 ซึ่งน้อยกว่า 20) ปริมาณดังกล่าวจึงเป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด

Table 3 Mean scores for four longan tea mixed with herb formulations from sensory evaluation

Attributes	Mean ± SD			
	Ratio of longan and herb			
	25:75	50:50	60:40	75:25
Appearance	6.1 ± 1.7^{c}	7.0 ± 1.3^{ab}	7.3 ± 1.1^{a}	6.6 ± 1.3^{bc}
Color	5.7 ± 1.8^{b}	6.9 ± 1.5^{a}	7.1 ± 1.1^{a}	6.5 ± 1.5^{a}
Overall aroma^{ns}	6.3 ± 1.3	6.5 ± 1.3	6.7 ± 1.2	6.2 ± 1.4
Sweetness	5.9 ± 1.6^{ab}	5.7 ± 1.6^{b}	6.4 ± 1.4^{a}	6.0 ± 1.5^{ab}
Longan flavor	6.1 ± 1.5^{b}	6.0 ± 1.6^{b}	6.5 ± 1.5^{ab}	6.7 ± 1.0^{a}
Herb flavor^{ns}	6.3 ± 1.4	6.1 ± 1.4	6.3 ± 1.3	6.6 ± 1.2
Overall flavor^{ns}	6.3 ± 1.3	6.1 ± 1.3	6.4 ± 1.3	6.5 ± 1.2
Overall taste^{ns}	6.3 ± 1.3	6.0 ± 1.4	6.5 ± 1.2	6.3 ± 1.1
Overall liking	6.3 ± 1.3^{ab}	6.0 ± 1.3^{b}	6.6 ± 1.1^{a}	6.3 ± 1.3^{ab}

^{a,b,c} Different letters in the same row indicated significant difference ($p \leq 0.05$)

ns: Not significant

การศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่พัฒนาได้ทางด้านเคมีและจุลชีววิทยา

จากการศึกษาคุณภาพทางด้านเคมีของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่พัฒนาได้โดยวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีต่างๆ และทางด้านจุลชีววิทยา ได้ผลดังตารางที่ 5 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH assay ABTS assay และ FRAP นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ยังประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.57 ± 0.17 g GAE/100 g dry weight และจากการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านจุลชีววิทยาโดยวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด โคลิฟอร์ม ยีสต์และรา พบว่าผลิตภัณฑ์มีค่าอยู่ในเกณฑ์ตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลิตภัณฑ์สมุนไพรรวมแห้งชงดื่ม (มผช. 996/2556) กำหนด

การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์

จากการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ชาลำไยผสมสมุนไพรรวม 9 ชนิดแบบซองชง ผลพบว่าในด้านความชอบทางด้านลักษณะปรากฏและสีมีคะแนนอยู่ในระดับความชอบปานกลาง (คะแนน 7.0 และ 7.1 ตามลำดับ) ส่วนด้านกลิ่นรส รสชาติและความชอบโดยรวม ได้คะแนนเฉลี่ยอยู่ในช่วงระดับชอบเล็กน้อย

ถึงชอบปานกลาง (คะแนนอยู่ในช่วง 6.8-6.9) และจากการสอบถามด้านการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามโดยส่วนใหญ่ (ร้อยละ 90.1) ให้การยอมรับผลิตภัณฑ์

Table 4 Mean scores of three levels stevia adding for longan tea mixed with herb formulations from sensory evaluation

Attributes	Mean ± SD		
	Level of Stevia adding		
	0.00 g	0.05 g	0.10 g
Appearance ^{ns}	7.2 ± 0.9	7.3 ± 0.9	7.2 ± 1.1
Color	6.9 ± 1.0^{b}	7.3 ± 0.9^{a}	7.2 ± 1.0^{a}
Overall aroma ^{ns}	6.4 ± 1.2	6.4 ± 1.5	6.3 ± 1.4
Sweetness ^{ns}	5.6 ± 1.9	6.1 ± 1.7	6.0 ± 1.6
Longan flavor	5.3 ± 1.8^{b}	6.1 ± 1.5^{a}	6.3 ± 1.7^{a}
Herb flavor ^{ns}	6.3 ± 1.4	6.1 ± 1.5	6.3 ± 1.4
Overall flavor ^{ns}	6.0 ± 1.4	6.3 ± 1.3	6.2 ± 1.4
Overall Taste ^{ns}	6.0 ±1.6	6.2 ± 1.3	6.1 ± 1.4
Overall liking ^{ns}	6.0 ± 1.5	6.3 ± 1.3	6.2 ± 1.3

^{a,b} Different letters in the same row indicated significant difference ($p \leq 0.05$)

ns: Not significant

Table 5 Chemical and Microbiological quality of Longan Tea Mixed with 9 Herbs beverage

Qualities	Product	Criteria
Chemical qualities		
Antioxidant activity		
by DPPH assay (mmol Trolox/100 g dry weight)	6.21 ± 1.23	-
by ABTS assay (mmol Trolox/100 g dry weight)	8.43 ± 2.12	-
by FRAP assay (mg $FeSO_4$/100 g dry weight)	9.57 ± 2.07	-
Total phenolic content (g GAE/100 g dry weight)	0.57 ± 0.17	-
Microbiological qualities		
Total bacterial (CFU/ 1 g sample)	9.1 x 10^3	1.0 x 10^4
Coliform (MPN/100 ml)	<2.2	2.2
Yeast and Mold (CFU/ 1 g sample)	2.6 x 10	1 x 10^2

สรุป

จากการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ชาลำไยผสมสมุนไพรรวม 9 ชนิดแบบซองชง พบว่าจากคุณประโยชน์ในการมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของเนื้อและลำไยอบแห้ง เมื่อนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ สูตรที่เหมาะสมที่สุดคือสูตรที่ประกอบด้วยเนื้อลำไยร้อยละ 30 เมล็ดลำไยร้อยละ 30 และสมุนไพรรวม 9 ชนิดร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งสูตรดังกล่าวต้องเติมหญ้าหวานปริมาณ 0.10 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ มีคุณภาพทางจุลชีววิทยาตามเกณฑ์ที่ มผช. กำหนด และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคโดยส่วนใหญ่ (90.1%) ซึ่งให้คะแนนความชอบผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนการวิจัย ขอขอบคุณบริษัท สวนกนกอัณณ์ จำกัด ที่สนับสนุนวัตถุดิบ และขอขอบคุณภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กองควบคุมอาหาร. 2549. **แนวทางการพิจารณาอาหารประเภท "ชาสมุนไพร"**. สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา.

วรางคณา จุ้งลก. 2553. กรดเอลลาจิกและฤทธิ์ต้านมะเร็ง. **วารสารโรคมะเร็ง** 30 (3): 112-119.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2556. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสมุนไพรรวมแห้งชงดื่ม**. มผช. 996/2556.

AOAC. 2012. **Official Methods of Analysis of AOAC international**. 19th ed. Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, Maryland, USA.

Brand-Williams, W., M.E. Cuvelier and C. Berset. 1995. Use of a Free Radical Method to Evaluate Antioxidant. **LWT- Food Science and Technology** 28 (1): 25-30.

Deetae, P., P. Parichanon, P. Trakunleewatthana, C. Chanseetis and S. Lertsiri. 2012. Antioxidant and anti-glycation properties of Thai herbal teas in comparison with conventional teas. **Food Chemistry** 133: 953–959.

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 (5): 1387-1392.

Wojdylo, A., J. Oszmiañski and R. Czemerys. 2007. Antioxidant activity and phenolic compounds in 32 selected herbs. **Food Chemistry** 105 (3): 940–949.

ลักษณะทางประสาทสัมผัส ความชอบและอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น

Sensory Characteristics, Consumer Liking and Emotions of Virgin Coconut Oil Products

นำสุข ศรีเจริญ[1*] ธงชัย สุวรรณสิชณน์[1] และ สุนทรี สุวรรณสิชณน์[1]

Numsook Srijaroen[1*], Thongchai Suwonsichon[1] and Suntaree Suwonsichon[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสที่แตกต่างกันต่อความชอบและการประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภคจากการทดสอบโดยการชิมผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นทางการค้าจำนวน 7 ยี่ห้อ ที่มีกรรมวิธีการผลิตแตกต่างกัน ประกอบด้วยวิธีการกลั่นสุญญากาศ 1 ตัวอย่าง (S1), การบีบโดยใช้เครื่องหีบน้ำมัน 1 ตัวอย่าง (S2), การหมุนเหวี่ยง 4 ตัวอย่าง (S3, S4, S5, S6) และ การหมัก 1 ตัวอย่าง (S7) จากการทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้ง 7 ยี่ห้อ มีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสจำนวน 12 คุณลักษณะที่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) พบว่าสามารถอธิบายความแปรปรวนรวมของ 2 องค์ประกอบแรก (PCs) ได้ 90.21% (PC1 52.50% และ PC2 37.71%) โดยเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกับการทดสอบความชอบและการประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึก พบว่ากลุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด และคำศัพท์กลุ่มอารมณ์และความรู้สึกในเชิงบวก คือ ตัวอย่าง S4, S5 และ S7 โดยมีลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสน้ำมะพร้าวและกลิ่นรสดอกไม้ระดับสูง ส่วนกลุ่มตัวอย่างที่มีคะแนนความชอบน้อยและมีกลุ่มคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกในเชิงลบ ได้แก่ ตัวอย่าง S1, S2, S3 และ S6 จะเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะทางประสาทสัมผัสที่มีกลิ่นรสเปลือกไม้และกลิ่นรสแห้งระดับปานกลางถึงสูง

ABSTRACT

The objectives of this study were to study effects of the flavor characteristics on consumer liking and emotion terms of 7 commercial Virgin Coconut Oil (VCO) products. Seven VCOs from different processes consisting of one vacuum distillated VCOs (S1), one mechanical pressed VCOs (S2), four centrifuged VCOs (S3, S4, S5 and S6), and one fermented VCOs (S7) were used in this study. Results demonstrated that 12 sensory attributes significantly different ($P \leq 0.05$) among VCOs. The results of the principle component analysis (PCA) showed that PCA reduced 12 attributes into two independent principle components (PCs) which accounted for 90.21% (PC1 52.50% and PC2 37.71%). VCO samples having the highest overall liking score and positive emotion terms were S4, S5 and S7. These samples had strongly coconut juice and floral flavor. While, VCO samples having the low overall liking score and negative emotion terms were S1, S2, S3 and S6. They had moderately to highly woody and dry flavor.

Key Words: virgin coconut oil, flavor characteristics, consumer liking, emotion

* Corresponding author; e-mail address: Numsook16@gmail.com

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น (Virgin coconut oil) เป็นน้ำมันที่สกัดได้จากเนื้อมะพร้าวแก่ มีลักษณะเป็นของเหลวใสหรือสีเหลืองอ่อน มีกลิ่นเฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต (ณรงค์, 2554; APCC, 2009) ปัจจุบันน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นกำลังได้รับความนิยมในกลุ่มผู้รักสุขภาพ เนื่องจากการรับรู้ประโยชน์ของน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นที่เพิ่มมากขึ้น (Satheesh, 2015) จากข้อมูลของ Index mundi (2017) และจิตจริยา และ นิตยา (2558) พบว่าในปี 2559 ผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวในประเทศไทย มีปริมาณการบริโภค 28 พันตัน รวมเป็นมูลค่า 1,000-1,500 ล้านบาท โดยมีแนวโน้มการบริโภคเติบโตคิดเป็นร้อยละ 7.69 จากการสำรวจข้อมูลทางการตลาดน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นทางการค้ามีความหลากหลายทั้งในด้านยี่ห้อ ราคา กรรมวิธีผลิต เป็นต้น ผู้บริโภคส่วนใหญ่นิยมนำน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นมาบริโภคโดยตรงและใช้เพื่อความงาม เช่น การบำรุงผิวพรรณ ซึ่งปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ (product) ที่มีความสำคัญมากต่อความชอบและการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น ได้แก่ สี ความใสและกลิ่นของน้ำมันมะพร้าว (จิตจริยา และ นิตยา 2558; มนทกานติ์, 2559) ดังนั้น การศึกษาด้านลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นร่วมกับความชอบของผู้บริโภคจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งการศึกษาลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ นิยมใช้การศึกษาลักษณะทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงพรรณนา โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถบ่งบอกลักษณะทางประสาทสัมผัสที่พบในผลิตภัณฑ์และความเข้มของลักษณะนั้นๆ (Meilgaard, 1991) แต่เนื่องจากมีงานวิจัยของ มนทกานติ์ (2559) ที่ศึกษาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏและกลิ่นของน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นต่อความชอบของผู้บริโภคในการนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์บำรุงผิว ซึ่งพบว่าตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นที่มีกลิ่นเฉพาะของมะพร้าว กลิ่นหวานและกลิ่นวานิลลาสังเคราะห์สูงจะส่งผลให้ความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์สูง แต่ยังขาดงานวิจัยที่ศึกษาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสของน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นต่อความชอบของผู้บริโภค

ปัจจุบันการศึกษาข้อมูลความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เพียงอย่างเดียว อาจยังไม่เพียงพอต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เนื่องจากปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ นั่นก็คืออารมณ์และความรู้สึกของผู้บริโภค (Kang *et al*., 2010) การประเมินอารมณ์และความรู้สึกจะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากความชอบของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ (King and Meiselman, 2010) ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการศึกษาด้านอารมณ์และความรู้สึกร่วมกับการทดสอบความชอบ เช่น ผลิตภัณฑ์น้ำแบล็กเบอร์รี่ (Ng *et al*., 2013) พบว่าคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกมีความสัมพันธ์กับคะแนนความชอบสูง โดยอารมณ์ในเชิงบวกจะมีผลกับความชอบในเชิงบวกหรือในตัวอย่างผลิตภัณฑ์กาแฟ (Bhumiratana *et al*., 2014) พบว่ากลุ่มผู้บริโภคกาแฟที่มีความชอบกาแฟแตกต่างกันจะมีการประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์ความรู้สึกที่แตกต่างกัน

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของลักษณะทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาด้านกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น ต่อความชอบและการประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภคจากการทดสอบด้วยการชิม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นให้ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

ตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นทางการค้าจำนวน 7 ยี่ห้อ โดยคัดเลือกจากตัวอย่างที่มีกรรมวิธีการผลิตแตกต่างกัน หาซื้อได้ง่ายและทราบกรรมวิธีการผลิตที่ชัดเจน ประกอบด้วยวิธีการกลั่นสุญญากาศ 1 ตัวอย่าง (S1), การบีบโดยใช้เครื่องหีบน้ำมัน 1 ตัวอย่าง (S2), การหมุนเหวี่ยง 4 ตัวอย่าง (S3, S4, S5, S6) และการหมัก 1 ตัวอย่าง (S7) สุ่มจากห้างสรรพสินค้าในเขตกรุงเทพมหานครฯและผู้ผลิตโดยตรง น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นทุกตัวอย่างจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส (^{O}C) โดยนำตัวอย่างออกมาวางอุณหภูมิห้อง (25 ^{O}C) ก่อนการทดสอบขั้นตอนต่อไป

การศึกษาลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น

ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 9 คน จากหน่วยวิจัยทางประสาทสัมผัสและผู้บริโภคแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University Sensory and Consumer Research Unit; KUSCR) พัฒนาคำศัพท์ ฝึกฝนผู้ทดสอบ และประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงพรรณนา คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาทั้ง 12 คุณลักษณะที่ถูกพัฒนาขึ้น ได้แก่ กลิ่นรสน้ำมัน (Oil) กลิ่นรสน้ำมะพร้าว (Coconut juice) กลิ่นรสเฉพาะของมะพร้าว (Coconut ID) กลิ่นรสหวาน (Sweet) กลิ่นรสคล้ายถั่ว (Nutty) กลิ่นรสดอกไม้ (Floral) กลิ่นรสน้ำตาลไหม้ (Brown) กลิ่นรสเปลือกไม้ (Woody) กลิ่นรสหืน (Rancid) กลิ่นรสอับ (Musty) กลิ่นรสแห้ง (Dry) และกลิ่นรสคั่ว (Roasted) เสิร์ฟตัวอย่างในถ้วยชิมสีขาวพร้อมฝาปิด ขนาด 2 ออนซ์ ปริมาณ 5 มิลลิลิตร พร้อมติดรหัสด้วยเลขสุ่ม 3 หลัก เสิร์ฟตัวอย่างแบบสุ่มทีละตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 25 ^{O}C ผู้ทดสอบประเมินความเข้มของคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรส 0-15 (น้อยไปมาก)

การทดสอบความชอบ และการประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น

ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน ซึ่งเป็นนิสิตและบุคลากรภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่มีอายุระหว่าง 20-39 ปี เสิร์ฟตัวอย่างในถ้วยชิมสีขาวพร้อมฝาปิดขนาด 2 ออนซ์ ปริมาณ 5 มิลลิลิตร พร้อมติดรหัสด้วยเลขสุ่ม 3 หลัก เสิร์ฟตัวอย่างแบบสุ่มทีละตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 25 ^{O}C ผู้ทดสอบประเมินความชอบด้วยวิธี 9-Point Hedonic scale (1 = ไม่ชอบมากที่สุด ถึง 9 = ชอบมากที่สุด) ในคุณลักษณะความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวมและความชอบโดยรวม แล้วจึงประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกที่สามารถรับรู้ได้ในผลิตภัณฑ์ด้วยวิธี check-all-that-apply (CATA) คำศัพท์ทางด้านอารมณ์และความรู้สึกในแบบสอบถาม CATA ทั้ง 17 คำศัพท์ ได้จากการคัดเลือกและดัดแปลงคำศัพท์ทางอารมณ์และความรู้สึกจาก King and Meiselman (2010) และจากการอภิปรายกลุ่ม

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ข้อมูลจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา คำนวณคะแนนระดับความเข้มเฉลี่ยในแต่ละคุณลักษณะทั้งหมด 12 คุณลักษณะ วิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (MANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่างด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

(version 12) จากนั้นนำคะแนนลักษณะทางประสาทสัมผัสที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติมาวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis; PCA) และหมุนแกนด้วยวิธีแวรีแมกซ์ (Varimax) โดยสกัดปัจจัยที่มีค่าไอเกน (Eigenvalue) มากกว่า 1 ร่วมกับการจำแนกกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธี Agglomerative Hierarchical Cluster Analysis (AHC) แบบ Euclidean distance ด้วยโปรแกรม XLSTAT® (version 2006)

2. ข้อมูลจากการทดสอบความชอบ คำนวณคะแนนความชอบเฉลี่ยในคุณลักษณะความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวมและความชอบโดยรวม วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่างด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (version 12) และใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ XLSTAT® (version 2006) วิเคราะห์แผนภาพความชอบ (Preference Mapping) ด้วยเทคนิค Partial Least Square Regression (PLS) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความชอบของผู้บริโภคกับคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา

3. ข้อมูลจากการศึกษาอารมณ์และความรู้สึกของผู้บริโภค นำมาวิเคราะห์ค่าความถี่ และสร้างเมทริกซ์ความถี่จากข้อมูลความถี่ของคำศัพท์ทางอารมณ์และความรู้สึกที่ผู้บริโภคเลือกใช้อธิบายผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น และวิเคราะห์ความสอดคล้อง (Correspond analysis) ด้วยโปรแกรม R (version 2.15.1) เพื่อสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น 7 ยี่ห้อกับคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกที่พบในผลิตภัณฑ์ (Meyners *et al.*, 2013)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสในผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น

การประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงพรรณนา พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มของคุณลักษณะทางประสาทด้านกลิ่นรสทั้ง 12 คุณลักษณะ ของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น 7 ยี่ห้อ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

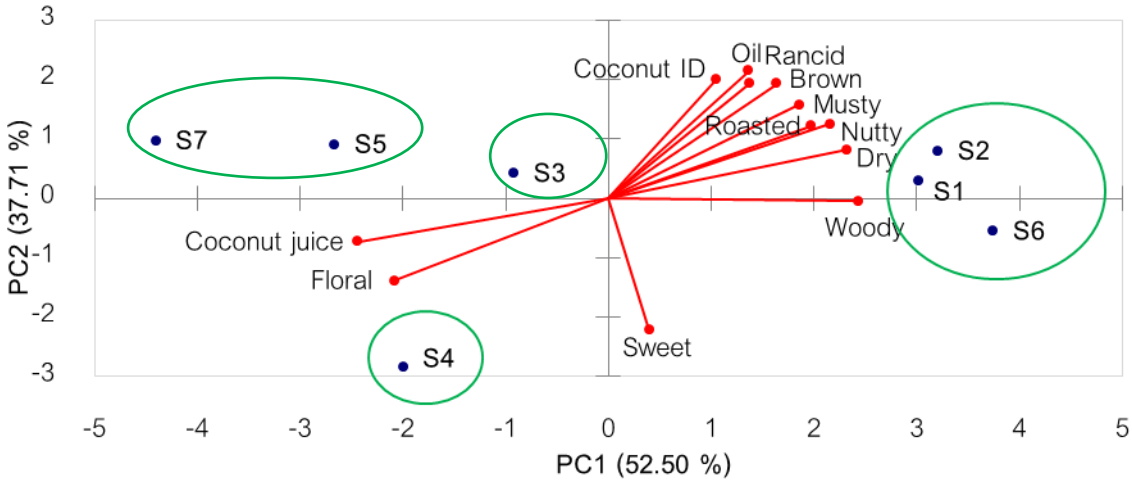


Figure 1 Biplot of the first two principle components for describing flavor attributes and grouping VCO samples. VCO sample codes: S1 (vacuum distillated VCOs), S2 (mechanical pressed VCOs), S3, S4, S5 and S6 (centrifuged VCOs), and S7 (fermented VCOs).

เมื่อนำค่าจากการประเมินทางประสาทสัมผัส มาวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) เพื่อหาความสัมพันธ์ของลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสกับผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น และหมุนแกนองค์ประกอบด้วยวิธีแวรีแมกซ์(Varimax) พบว่า องค์ประกอบหลัก 2 องค์ประกอบแรก (PCs) สามารถอธิบายความแปรปรวนรวมได้ร้อยละ 90.21 แบ่งเป็นความแปรปรวนองค์ประกอบที่ 1 (PC1) อธิบายได้ร้อยละ 52.50 และองค์ประกอบที่ 2 (PC2) อธิบายได้ร้อยละ 37.71 โดย PC1 มีความสัมพันธ์ด้านบวกกับคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรส ได้แก่ กลิ่นรสคล้ายถั่ว (Nutty) กลิ่นรสเปลือกไม้ (Woody) กลิ่นรสอับ (Musty) กลิ่นรสแห้ง (Dry) และกลิ่นรสคั่ว (Roasted) และมีความสัมพันธ์ด้านลบกับ กลิ่นรสน้ำมะพร้าว (Coconut juice) และกลิ่นรสดอกไม้ (Floral) ในขณะที่ PC2 มีความสัมพันธ์ในด้านบวกกับกลิ่นรสน้ำมัน (Oil) กลิ่นรสเฉพาะของมะพร้าว (Coconut ID) กลิ่นรสน้ำตาลไหม้ (Brown) และกลิ่นรสหืน (Rancid) และมีความสัมพันธ์ด้านลบกับกลิ่นรสหวาน (Figure 1)

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ร่วมกับการจำแนกกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธี AHC ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดัง Figure 1 พบว่า สามารถจำแนกตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นได้ ออกเป็น 4 กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มมีลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรส ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ได้แก่ S1, S2, และ S6 เป็นน้ำมันที่มีกลิ่นรสน้ำมัน (Oil) กลิ่นรสคล้ายถั่ว (Nutty) กลิ่นรสเปลือกไม้ (Woody) กลิ่นรสอับ (Musty) กลิ่นรสแห้ง (Dry) และกลิ่นรสคั่วสูง (Roasted) กลุ่มที่ 2 ได้แก่ S3 เป็นน้ำมันที่มีกลิ่นรสน้ำมะพร้าว (Coconut juice) กลิ่นรสดอกไม้ (Floral) และกลิ่นรสคล้ายกับน้ำมันกลุ่มที่ 1 อยู่ระดับปานกลาง กลุ่มที่ 3 ได้แก่ S5, และ S7 เป็นน้ำมันที่มีกลิ่นรสน้ำมะพร้าว (Coconut juice) กลิ่นรสดอกไม้สูง (Floral) และกลุ่มที่ 4 ได้แก่ S4 เป็นน้ำมันที่มีกลิ่นรสน้ำมะพร้าว (Coconut juice) กลิ่นรสดอกไม้ (Floral) และกลิ่นรสหวาน (sweet) สูง

2. การทดสอบความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น

การทดสอบความชอบของผู้บริโภคช่วงอายุ 20-39 ปี ต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น 7 ยี่ห้อ แสดงดัง Table 1 พบว่าคะแนนความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวมและความชอบโดยรวมของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น 7 ยี่ห้อ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยตัวอย่างน้ำมันมะพร้าว S4, S5 และ S7 มีคะแนนความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวมและความชอบโดยรวมสูงสุด รองลงมาคือกลุ่มตัวอย่าง S2, S3 และ S6 ส่วนตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวที่มีคะแนนความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวมและความชอบโดยรวมน้อยที่สุด ได้แก่ S1

Table 1 Overall flavor and Overall liking score of Commercial Virgin Coconut Oil 7 Brands.

Attribute	Liking score of VCO samples						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Overall flavor	4.5c	5.4b	5.2b	6.0a	6.3a	5.1bc	6.1a
Overall liking	4.4c	5.3b	5.2b	6.1a	6.3a	5.0bc	6.0 a

note *Liking score is rated from 1 to 9 (1 is the dislike extremely; 5 is the neither liker nor dislike; 9 is the like extremely)

a-c means followed by different upper case letters in the same row indicate significant differences($p \leq 0.05$)

VCO sample codes: S1 (vacuum distillated VCOs), S2 (mechanical pressed VCOs), S3, S4, S5 and S6 (centrifuged VCOs), and S7 (fermented VCOs).

เมื่อนำค่าจากการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา กับค่าคะแนนความชอบโดยรวม มาวิเคราะห์แผนภาพความชอบภายนอก (External preference mapping) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนความชอบกับตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น 7 ยี่ห้อ ผลแสดงดัง Figure 2 พบว่า กลุ่มตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น S3, S5 และ S7 มีทิศทางเข้าใกล้ความชอบโดยรวม (Overall liking) มากที่สุด โดยปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับความชอบโดยรวม ได้แก่ กลิ่นรสน้ำมะพร้าว (Coconut juice) และกลิ่นรสดอกไม้ (Floral) และปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับความชอบโดยรวม ได้แก่ กลิ่นรสเปลือกไม้ (Woody) และกลิ่นรสแห้ง (Dry) ดังนั้น เมื่อกลิ่นรสน้ำมะพร้าว (Coconut juice) และกลิ่นรสดอกไม้ (Floral) เพิ่มขึ้น กลิ่นรสเปลือกไม้ (Woody) และกลิ่นรสแห้ง (Dry) ลดลง ผู้บริโภคจึงมีแนวโน้มชอบผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

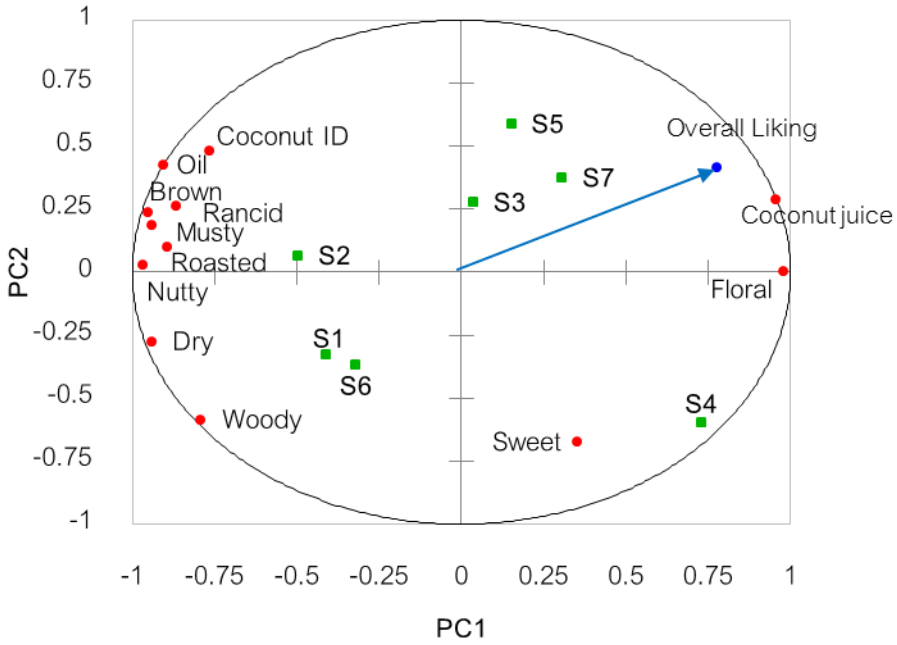


Figure 2 External preference map obtained by PLS regression of descriptive data (flavor characteristics) and consumer's overall liking scores. VCO sample codes: S1 (vacuum distillated VCOs), S2 (mechanical pressed VCOs), S3, S4, S5 and S6 (centrifuged VCOs), and S7 (fermented VCOs).

3. การประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกของผู้บริโภค ด้วยวิธี Check-All-That-Apply (CATA)

จากการประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกของผู้บริโภคต่อน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น พบว่ามีคำศัพท์ทางอารมณ์และความรู้สึก 17 คำศัพท์ที่ผู้บริโภคระบุได้ ประกอบด้วยคำศัพท์อารมณ์และความรู้สึกเชิงบวก 11 คำ ได้แก่ สดชื่น (Fresh) ธรรมชาติ (Natural) กระตือรือร้น/มีพลัง (Energetic) มีความสุข (Happy) ผ่อนคลาย (Relaxed) รู้สึกดี (Feel good) สะอาด/ปลอดภัย (Clean/Safe) ดีต่อสุขภาพ (Healthy) พึงพอใจ (Satisfied) ดูน่าสนใจ (Interested) และแปลกใหม่ (Novelty) และเชิงลบ 6 คำ ได้แก่ วิตกกังวล (Worried) ขนลุก(Goosebumps) ผิดหวัง (Disappointed) โบราณ (Old) ขยะแขยง (Disgust) และเป็นทุกข์ (Unhappy)

จากการวิเคราะห์ความสอดคล้อง (Correspondence analysis) แสดงดัง Figure 3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น 7 ยี่ห้อกับคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกที่พบในผลิตภัณฑ์ โดย

แสดงผลแบบองค์ประกอบ 2 มิติ ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปร ได้เท่ากับร้อยละ 75.79 พบว่ากลุ่มผู้บริโภคจำนวน 50 คน มีการรับรู้คำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกในแต่ละตัวอย่างแตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วย ตัวอย่าง S1 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกทางด้านลบสูง ได้แก่ วิตกกังวล (Worried) ขนลุก (Goosebumps) ผิดหวัง (Disappointed) ขยะแขยง (Disgust) และเป็นทุกข์ (Unhappy) กลุ่มที่ 2 คือ ตัวอย่าง S2, S3 และ S6 มีความสัมพันธ์กับคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกทางด้านลบสูง ได้แก่ โบราณ (Old) และมีความสัมพันธ์กับคำศัพท์คล้ายกับกลุ่มที่ 1 แต่มีความสัมพันธ์น้อยกว่า ส่วนกลุ่มที่ 3 คือ ตัวอย่าง S4, S5 และ S7 มีความสัมพันธ์กับคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกทางด้านบวก ได้แก่ สดชื่น (Fresh) กระตือรือร้น/มีพลัง (Energetic) มีความสุข (Happy) ผ่อนคลาย (Relaxed) รู้สึกดี (Feel good) สะอาด/ปลอดภัย (Clean/Safe) ดีต่อสุขภาพ (Healthy) พึงพอใจ (Satisfied) และดูน่าสนใจ (Interested)

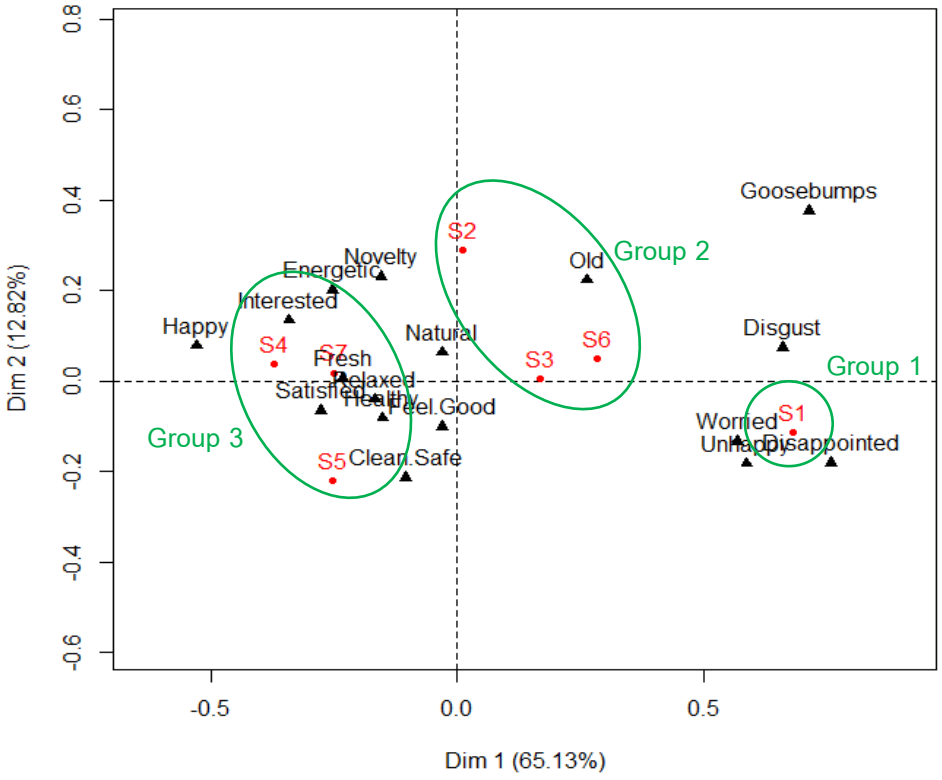


Figure 3 Representation of the VCO samples and emotion terms in the first two dimensions of the correspondence analysis. VCO sample codes: S1 (vacuum distillated VCOs), S2 (mechanical pressed VCOs), S3, S4, S5 and S6 (centrifuged VCOs), and S7 (fermented VCOs).

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงพรรณนา ร่วมกับการทดสอบความชอบ การประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกของผู้บริโภค พบว่า ตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวที่มีลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสที่แตกต่างกันส่งผลต่อความชอบและการประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภค โดยกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ S4, S5 และ S7 ซึ่งมีกลิ่นรสน้ำมะพร้าว (Coconut juice) และกลิ่นรสดอกไม้ (Floral) ระดับสูง ส่งผลให้มีคะแนนความชอบสูงสุด และมีอารมณ์และความรู้สึกในเชิงบวกต่อตัวอย่าง

น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น ส่วนกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ S1, S2, S3 และ S6 ซึ่งมีกลิ่นรสเปลือกไม้ (Woody) และกลิ่นรสแห้ง (Dry) ระดับปานกลางถึงสูง ส่งผลให้คะแนนความชอบลดน้อยลงและมีอารมณ์และความรู้สึกในเชิงลบมากขึ้น จึงกล่าวได้ว่า คุณภาพของลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสของน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ผู้ผลิตควรคำนึงถึง เนื่องจากส่งผลต่อความชอบของผู้บริโภคและการใช้คำศัพท์ด้านอารมณ์และความรู้สึกมาทดสอบร่วมกับการทดสอบความชอบ อาจจะเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มรายละเอียดของข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไปได้

สรุป

จากการศึกษากลิ่นรสของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นทางการค้า 7 ยี่ห้อ ที่มีกรรมวิธีการผลิตแตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา ความชอบและการประเมินคำศัพท์ด้านอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภค พบว่าตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวที่มีลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสที่แตกต่างกันส่งผลต่อความชอบและอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภคที่แตกต่างกัน โดยกลุ่มตัวอย่างที่มีกลิ่นรสน้ำมะพร้าว (Coconut juice) และกลิ่นรสดอกไม้ (Floral) ปริมาณสูง ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นที่ผลิตจากวิธีการหมุนเหวี่ยง(โดยผู้ผลิตรายใหญ่)และจากการหมัก จะส่งผลให้มีคะแนนความชอบโดยรวมสูง และผู้บริโภคมีอารมณ์และความรู้สึกที่รับรู้ได้ในเชิงบวกมากกว่ากลุ่มตัวอย่างที่มีกลิ่นรสเปลือกไม้ (Woody) และกลิ่นรสแห้ง (Dry) ระดับปานกลางถึงสูง ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นที่ผลิตจากวิธีการหมุนเหวี่ยง(โดยผู้ผลิตรายย่อย) การบีบโดยใช้เครื่องหีบน้ำมันและวิธีการกลั่นสุญญากาศ ซึ่งกลุ่มตัวอย่างนี้จะมีคะแนนความชอบลดน้อยลง และผู้บริโภคมีอารมณ์และความรู้สึกที่รับรู้ได้ในเชิงลบมากขึ้น จึงกล่าวได้ว่า การผลิตน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยงโดยผู้ผลิตรายใหญ่และจากการหมักเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำมะพร้าวสกัดเย็นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างเหมาะสม ผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตที่สามารถเพิ่มปริมาณกลิ่นรสน้ำมะพร้าวและกลิ่นรสดอกไม้ และลดปริมาณกลิ่นรสเปลือกไม้และกลิ่นรสแห้งของผลิตภัณฑ์ได้

เอกสารอ้างอิง

จิตจริยา หอธรรม และ นิตยา เจรียงประเสริฐ. 2558. ส่วนผสมทางการตลาดที่มีผลต่อผู้บริโภคในกรุงเทพมหานครในการซื้อน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์สกัดเย็น. **วารสารบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่** 1(3): 88-103.

ณรงค์ โฉมเฉลา. 2554. **มหัศจรรย์ น้ำมันมะพร้าว**. โพสต์ พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

มนฑกานติ์ เอี่ยมแก้ว. 2559. **การจัดกลุ่มน้ามันมะพร้าวสกัดเย็นด้วยวิธีวิเคราะห์ทางเครื่องมือและประสาทสัมผัส**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

APCC. 2009. **APCC Standards for virgin coconut oil**. Asian and Pacific Coconut Community. Available Source: http://www.apccsec.org/standards.htm, May 21, 2016.

Bhumiratana, N., K. Adhikari, E. Chambers. 2014. The development of an emotion lexicon for the coffee drinking experience. **Food Research International** 61: 83–92.

Index mundi. 2017. **Thailand Coconut Oil Food Use Domestic Consumption by Year.** Available Source: https://www.indexmundi.com/agriculture/?country=th&commodity=coconut-oil&graph=food-use-domestic-consumption, December 11, 2017.

Kang, J.H., B. Jin and M. Gavin. 2010. The positive emotion elicitation process of Chinese consumer toward a U.S. apparel brand: a cognitive appraisal perspective. **J. Korean Soc. Cloth Text.** 34(12): 1992-2005.

King, S. C. and H.L. Meilselman. 2010. Development of a method to measure consumer emotions associated with foods. **Food Quality and Preference** 21: 168-177.

Meilgaard, M.C., G.V. Civille and B.T. Carr. 1991. **Sensory evaluation techniques.** 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Meyners, M., J.C. Castura and B.T. Carr. 2013. Existing and new approaches for the analysis of CATA data. **Food Quality and Preference** 30: 309–319.

Ng, M., C. Chaya and J. Hort . 2013. Beyond liking: Comparing the measurement of emotional response using EsSense Profile and consumer defined check-all-that-apply methodologies. **Food Quality and Preference** 28: 193-205.

Satheesh, N. 2015. Review on production and potential applications of virgin coconut oil. **Annals. Food Science and Technology** 16(1): 115-126.

Villarino, B. J., L. M. Dy, and Ma. C. C. Lizada. 2007. Descriptive sensory evaluation of virgin coconut oil and refined, bleached and deodorized coconut oil. **LWT** 40: 193-199.

ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส และอิทธิพลของเพศและอายุต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคา

Factor affecting Buying Decision and Influences of Gender and Age on Packaging Types and Price of Salad Dressing

นำสุข ศรีเจริญ[1*] ธงชัย สุวรรณสิชณน์[1] และ สุนทรี สุวรรณสิชณน์[1]

Numsook Srijaroen[1*], Thongchai Suwonsichon[1] and Suntaree Suwonsichon[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภคและอิทธิพลของเพศและอายุ ต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคาของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส โดยใช้แบบสอบถามสำรวจกลุ่มผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมาย อายุ 20-60 ปี จำนวน 240 คน สำหรับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค โดยให้คะแนนความสำคัญแต่ละปัจจัยจำนวน 16 ปัจจัย เมื่อนำตัวแปรทั้งหมดมาวิเคราะห์ปัจจัย พบว่า สามารถจัดกลุ่มตัวแปรที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อได้เป็น 5 ปัจจัย โดยสามารถอธิบายตัวแปรเดิมทั้งหมดได้ร้อยละ 61.25 ได้แก่ 1) ปัจจัยด้านยี่ห้อและสถานที่จัดจำหน่าย 2) ปัจจัยด้านการส่งเสริมการขาย 3) ปัจจัยด้านลักษณะของผลิตภัณฑ์ 4) ปัจจัยด้านประโยชน์และความปลอดภัย และ 5) ปัจจัยด้านลักษณะปรากฏ ส่วนการศึกษาอิทธิพลของเพศและอายุ ต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคาของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส พบว่า เพศไม่มีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคา ส่วนอายุมีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคา กลุ่มช่วงอายุ 20-39 ปี นิยมเลือกบรรจุภัณฑ์แบบขวดแก้ว และช่วงราคาต่ำกว่า 41 บาท ส่วนกลุ่มช่วงอายุ 40-60 ปี นิยมเลือกบรรจุภัณฑ์แบบขวดพลาสติก และราคาตั้งแต่ 41 บาทขึ้นไป

ABSTRACT

The objectives of this study were to study the factors affecting on consumer buying decision and influences of gender and age on packaging types & price of salad dressing products. Two hundred and forty targeted consumers were recruited in this study. For studying the factors affecting on consumer buying decision, consumers were asked to rate the importance of 16 buying decision variables. Factor analysis technique reduced sixteen buying decision variables into five factors. Totally explained cumulative variance was 61.25%. These five factors were 1) brand and buying place, 2) promotion, 3) product characteristics, 4) benefit and safety, and 5) appearance. Additionally, Influences of gender and age on packaging types and price of these products were studied. Results showed that the packaging types and price were not influenced by gender. While, the packaging types and price were influenced by age. It could be classified into two groups. These two groups were 1) age 20-39 years who preferred the glass bottle and price of less than 41 Bahts and 2) age 40-60 years who preferred the plastic bottle and price of more than 41 Bahts.

Key Words: salad dressing, buying decision, factor analysis, correspondence analysis, package, price

* Corresponding author; e-mail address: Numsook16@gmail.com

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

น้ำสลัดใสเป็นผลิตภัณฑ์น้ำปรุงรสสำหรับใส่ในสลัดเพื่อเพิ่มกลิ่นรสและรสชาติ (วไลภรณ์และคณะ , 2554) ปัจจุบันน้ำสลัดใสได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในกลุ่มผู้บริโภคคนไทยที่ต้องการดูแลสุขภาพ เพราะมีพลังงานต่ำ ไม่มีคอเลสเตอรอลจากไข่ และประกอบไปด้วยน้ำมันที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ เช่น น้ำมันมะกอก น้ำมันงา เป็นต้น จากรายงานของ Euromonitor International (2017) พบว่า ในปี 2559 ผลิตภัณฑ์น้ำสลัดในประเทศไทย มีปริมาณการบริโภค 2.70 พันตัน รวมเป็นมูลค่า 514 ล้านบาท และมีแนวโน้มมูลค่าการเติบโตเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 10 การขยายตัวของตลาดน้ำสลัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใสในท้องตลาดมีความหลากหลายทั้งในด้านตัวผลิตภัณฑ์ เช่น รสชาติ บรรจุภัณฑ์ ราคา การส่งเสริมการตลาดและช่องทางการจัดจำหน่าย ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค ดังนั้น เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับผู้ผลิตรายอื่น จึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคเพื่อนำมาใช้ในงานพัฒนาผลิตภัณฑ์ เนื่องจากข้อมูลทางประชากรศาสตร์ เช่น อายุ เพศ ส่งผลต่อพฤติกรรม ความต้องการและการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภคที่แตกต่างกัน (Philip, 2013)

การศึกษาปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค มีข้อมูลที่เป็นตัวแปรจำนวนมาก ส่งผลให้การวิเคราะห์ข้อมูลยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้น จึงมีการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis; FA) มาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล เทคนิคนี้จะช่วยลดจำนวนตัวแปรที่ศึกษาให้อยู่ในรูปตัวแปรใหม่ ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรเดิมได้ง่ายยิ่งขึ้น (กัลยา, 2559ข) นอกจากนี้การวิเคราะห์อิทธิพลของข้อมูลด้านประชากรศาสตร์กับพฤติกรรมของผู้บริโภคสามารถใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสอดคล้อง(Correspondence analysis; CA) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลทางการตลาด (Bhattacharyya and Dasgupta, 2014) ข้อมูลที่ได้จะแสดงออกมาในรูปแผนภาพเชิงรับรู้ (Perceptual map) หรือ แผนภาพความสอดคล้อง (Correspondence map) ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ดียิ่งขึ้น (ประสพชัย และคณะ, 2559) โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น เช่น การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เยลลี่ (ลดาวรรย์, 2558) การศึกษาผลของช่วงวัยต่อระดับความภักดีต่อตราสินค้าร้านขนมหวาน (จิรวรรณ และ ประสพชัย, 2559) และการศึกษาผลของราคาที่ผู้บริโภคยอมรับต่อตราสินค้าของผลิตภัณฑ์เครื่องหนัง (Bhattacharyya and Dasgupta, 2014) เป็นต้น แต่ยังไม่พบรายงานการวิจัยเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีดังกล่าวในผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจผู้บริโภค โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใสโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis; FA) และศึกษาอิทธิพลของข้อมูลเชิงประชากรศาสตร์ ได้แก่ เพศและอายุ ต่อพฤติกรรมการบริโภคด้านรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคาของผลิตภัณฑ์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสอดคล้อง(Correspondence analysis; CA) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแนวความคิดผลิตภัณฑ์และพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใสให้ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้สำรวจผู้บริโภคโดยใช้แบบสอบถามที่สร้างขึ้นจากการสำรวจผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใสที่วางจำหน่ายในท้องตลาด ในเขตกรุงเทพมหานคร และการสัมภาษณ์เชิงลึกตัวแทนกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายที่รู้จักหรือเคยรับประทานน้ำสลัดใสจำนวน 30 คน นำแบบสอบถามที่สร้างมาทดสอบความสมบูรณ์จำนวน 30 ชุด และ

แก้ไขปรับปรุงแบบสอบถามก่อนนำไปใช้จริง โดยการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือได้ (Reliability analysis) ของแบบสอบถาม ให้ค่าสัมประสิทธิ์ Cronbrah's alpha เท่ากับ 0.7 ขึ้นไป (กัลยา, 2559ก)

แบบสอบถามแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์ 2) ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส และ 3) ข้อมูลพฤติกรรมผู้บริโภคเกี่ยวกับรูปแบบบรรจุภัณฑ์ และราคาของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส

การสำรวจผู้บริโภค

สำรวจผู้บริโภคเป้าหมาย อายุ 20-60 ปี ที่รู้จักหรือเคยรับประทานน้ำสลัดใส สุ่มตัวอย่างจากในงานเกษตรแฟร์ประจำปี 2560 ระหว่างวันที่ 27 มกราคม – 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จำนวน 240 คน และให้กลุ่มตัวอย่างตอบแบบสอบถามทั้ง 3 ส่วน ดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยแบบสอบถามในส่วนที่ 2 กลุ่มตัวอย่างทำการตอบแบบสอบถามโดยให้คะแนนความสำคัญของคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ด้านต่างๆต่อปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อ โดยที่ 1 หมายถึงสำคัญน้อยที่สุด, 2 หมายถึงสำคัญน้อย, 3 หมายถึงสำคัญปานกลาง, 4 หมายถึงสำคัญมาก และ 5 หมายถึงสำคัญมากที่สุด ข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามทั้งหมดจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติต่อไป

การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลแบบสอบถามในส่วนที่ได้จากการสำรวจผู้บริโภคนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS (version 12) ดังนี้

1. ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์ของผู้บริโภคและพฤติกรรมผู้บริโภคเกี่ยวกับรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคาของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส (ส่วนที่ 1 และ 3) นำมาวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าความถี่และร้อยละ

2. ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใสของผู้บริโภค นำมาวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ความถี่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งค่าเฉลี่ยที่มากกว่า 4.21 คะแนน จะกำหนดให้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์มากที่สุดตามวิธีของ Cooper and Schindler (1978) จากนั้นนำคะแนนความสำคัญของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อ มาวิเคราะห์ปัจจัย (FA) เพื่อจัดกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันไว้ในกลุ่มปัจจัยเดียวกัน ซึ่งจะช่วยให้อธิบายปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อได้ง่ายขึ้น โดยขั้นตอนการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Principle Component Analysis; PCA) และหมุนแกนปัจจัยด้วยวิธีแวรีแมกซ์ (Varimax) โดยสกัดปัจจัยที่มีค่าไอเกน (Eigenvalue) มากกว่า 1 (กัลยา, 2559ข)

3. ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์ของผู้บริโภค ได้แก่ ด้านเพศและอายุ นำมาวิเคราะห์อิทธิพลต่อพฤติกรรมผู้บริโภคเกี่ยวกับรูปแบบบรรจุภัณฑ์ และราคาของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส (ส่วนที่ 3) ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความสอดคล้อง (Correspondence Analysis; CA) ประกอบด้วย การทดสอบค่า Chi-square ร่วมกับการวิเคราะห์แผนภาพความสอดคล้อง (Correspondence map) เพื่ออธิบายอิทธิพลของเพศและอายุ ต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคาของผลิตภัณฑ์ ตามวิธีการของ ประสพชัยและคณะ (2559)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์

ผู้ตอบแบบสอบถามจำนวน 240 คน มีเพศ อายุ การศึกษา อาชีพ และระดับรายได้ต่อเดือน ดังนี้ เพศชาย ร้อยละ 37, เพศหญิง ร้อยละ 63 โดยมีสัดส่วนของทุกช่วงอายุ ได้แก่ ช่วงอายุ 20-29 ปี, 30-39 ปี, 40-49 ปี และ 50-60 ปี เท่ากับร้อยละ 25 ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีระดับการศึกษา คือ ปริญญาตรี ร้อยละ 58 , ส่วนใหญ่ประกอบอาชีพ ข้าราชการ/รัฐวิสาหกิจ ร้อยละ 34 และมีรายได้ทั้งหมดต่อเดือน 20,001 - 30,000 บาท ร้อยละ 27 โดยข้อมูลด้านเพศและอายุถูกนำไปใช้ในการทดสอบอิทธิพลของเพศและอายุต่อพฤติกรรมผู้บริโภคเกี่ยวกับรูปแบบบรรจุภัณฑ์ และราคาของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใสในแบบสอบถามส่วนที่ 3 ต่อไป

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใสของผู้บริโภค

ผลการให้คะแนนความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใสของผู้บริโภคทั้ง 16 คุณลักษณะ เรียงลำดับคะแนนจากมากไปน้อย ดังแสดงใน Table 1 โดยตัวแปรที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อในระดับมากที่สุด มีทั้งหมด 2 ปัจจัย ได้แก่ กลิ่นรสและรสชาติ และเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ ซึ่งระดับคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.3 และ 4.2 ตามลำดับ

Table 1 Frequency and mean ± standard deviation (SD) of buying decision factors affecting to 240 consumers

Buying decision factors	Buying decision score*(Frequency)					Mean ± SD
	1	2	3	4	5	
Flavor and Taste	2	5	30	85	118	4.3 ± 0.8
Healthy product	6	3	34	97	100	4.2 ± 0.9
Standard certification	1	11	44	94	90	4.1 ± 0.9
Shelf life	4	12	59	95	70	3.9 ± 0.9
Ingredient	4	9	55	109	63	3.9 ± 0.9
Natural color	12	15	78	90	45	3.6 ± 1.0
Price	3	9	100	91	37	3.6 ± 0.8
Packaging type	3	11	98	94	34	3.6 ± 0.8
Packaging size	4	10	101	100	25	3.6 ± 0.8
Consistency	9	22	107	80	22	3.4 ± 0.9
Brand	11	17	106	83	23	3.4 ± 0.9
Oil type	24	24	80	77	35	3.3 ± 1.1
Buying place	9	29	113	69	20	3.3 ± 0.9
Novelty	13	39	103	56	29	3.2 ± 1.0
Promotion	13	49	118	49	11	3.0 ± 0.9
Advertisement	23	55	107	42	13	2.9 ± 1.0

note *Buying decision score is rated from 1 to 5 (1 is the least important; 5 is the most important)

จากข้อมูลใน Table 1 เมื่อนำคะแนนความสำคัญของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อทั้ง 16 ปัจจัย มาจัดกลุ่มปัจจัยใหม่โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปัจจัย ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบ(Principle Component analysis: PCA) และหมุนแกนปัจจัยด้วยวิธีแวรีแมกซ์ (varimax) ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน Table 2 พบว่า สามารถจัดกลุ่มปัจจัยเดิม ได้เป็น 5 กลุ่มปัจจัย ซึ่งสามารถอธิบายความแปรปรวนของปัจจัยเดิมทั้งหมดได้ร้อยละ 61.25 พิจารณาจากปัจจัยที่มีค่า Eigenvalue มากกว่า 1 (กัลยา, 2559ข)

Table 2 Factor loading of rotated component matrix

Buying decision factors	Factor loading after Varimax rotation				
	1	2	3	4	5
Brand	0.681	0.106	0.264	0.091	0.287
Buying place	0.812	0.145	-0.008	0.191	-0.039
Promotion	0.194	0.706	0.132	0.014	0.200
Advertisement	0.105	0.811	0.110	-0.035	0.121
Novelty	0.035	0.743	0.040	0.179	0.029
Flavor and Taste	-0.184	-0.014	0.600	0.203	0.331
Price	0.146	0.087	0.778	-0.052	0.064
Packaging size	0.106	0.162	0.781	0.026	0.088
Packaging type	0.324	0.180	0.368	0.243	0.239
Oil type	-0.142	-0.203	0.129	0.553	0.024
Standard certification	0.270	-0.002	0.169	0.651	0.204
Healthy product	0.261	-0.016	-0.056	0.746	0.201
Ingredient	0.135	0.133	-0.125	0.723	0.311
Shelf life	-0.105	0.371	0.348	0.607	-0.169
Natural color	0.169	0.137	0.055	0.236	0.774
Consistency	-0.015	0.121	0.194	0.110	0.780
Eigenvalue	4.266	1.873	1.489	1.133	1.039
Variance explained (%)	9.773	12.737	12.737	15.166	10.837
Cumulative Variance explained (%)	9.773	22.510	35.247	50.413	61.250

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor analysis) ใน Table 2 สามารถอธิบายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อได้ ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 สามารถอธิบายความแปรปรวน ได้ร้อยละ 9.77 โดยตัวแปรที่ร่วมกันอธิบายปัจจัยนี้ได้ดีที่สุด ได้แก่ ตรายี่ห้อและสถานที่จัดจำหน่าย จึงนิยามปัจจัยนี้ว่า “ปัจจัยด้านยี่ห้อและสถานที่จัดจำหน่าย (Brand and Buying place)” ปัจจัยที่ 2 สามารถอธิบายความแปรปรวนเดิมได้ร้อยละ 12.74 โดยตัวแปรที่ร่วมกันอธิบาย

ปัจจัยนี้ได้ดีที่สุด ได้แก่ การส่งเสริมการขาย, การโฆษณาหรือการแจกชิมฟรีและความแปลกใหม่ของผลิตภัณฑ์ จึงนิยามปัจจัยนี้ว่า “ปัจจัยด้านการส่งเสริมการขาย (Promotion)” ปัจจัยที่ 3 สามารถอธิบายความแปรปรวนเดิมได้ร้อยละ 12.74 โดยตัวแปรที่ร่วมกันอธิบายปัจจัยนี้ได้ดีที่สุด ได้แก่ กลิ่นรสและรสชาติ ราคา ขนาดบรรจุ และรูปแบบบรรจุภัณฑ์ จึงนิยามปัจจัยนี้ว่า “ปัจจัยด้านลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Product characteristics)” ปัจจัยที่ 4 สามารถอธิบายความแปรปรวนเดิมได้ร้อยละ 15.17 โดยตัวแปรที่ร่วมกันอธิบายปัจจัยนี้ได้ดีที่สุด ได้แก่ ชนิดน้ำมัน การรับรองคุณภาพ เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ ส่วนประกอบและอายุการเก็บรักษา จึงนิยามปัจจัยนี้ว่า “ปัจจัยด้านประโยชน์และความปลอดภัย (Benefit and Safety)” และปัจจัยที่ 5 สามารถอธิบายความแปรปรวนเดิมได้ร้อยละ 10.84 โดยตัวแปรที่ร่วมกันอธิบายปัจจัยนี้ได้ดีที่สุด ได้แก่ สีตามธรรมชาติและลักษณะเนื้อสัมผัสของน้ำสลัดใส จึงนิยามปัจจัยนี้ว่า “ปัจจัยด้านลักษณะปรากฏ (Appearance)”

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น เมื่อเทียบ 5 กลุ่มปัจจัย กับคะแนนความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภคจาก Table 1 พบว่า ปัจจัย 2 กลุ่มอันดับแรก ได้แก่ ปัจจัยด้านลักษณะของผลิตภัณฑ์และปัจจัยด้านประโยชน์และความปลอดภัยมีคะแนนความสำคัญมาก ดังนั้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส ผู้ผลิตจึงควรคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้เป็นอันดับแรกในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไป

3. อิทธิพลของเพศและอายุต่อพฤติกรรมของผู้บริโภคด้านรูปแบบบรรจุภัณฑ์ และราคาของผลิตภัณฑ์

จากข้อมูลส่วนที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยด้านรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคา เป็นปัจจัยที่มีระดับสำคัญมากในการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค บรรจุภัณฑ์นอกจากมีบทบาทสำคัญต่อการคงคุณภาพและอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์แล้ว ยังเสมือนเป็นพนักงานขายเงียบ(Silent salesman) ที่ช่วยดึงดูดความสนใจของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์มากขึ้น (วิทวัส, 2552) ส่วนการกำหนดราคาที่เหมาะสม จะช่วยให้ผู้บริโภคตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น (นภวรรณ, 2556) ผลจากการสำรวจพฤติกรรมของผู้บริโภคต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์ และราคาของผลิตภัณฑ์ พบว่า ส่วนใหญ่ผู้บริโภคเลือกรูปแบบบรรจุภัณฑ์แบบขวดแก้ว คิดเป็นร้อยละ 43 และราคาช่วง 41-50 บาท คิดเป็นร้อยละ 31 แสดงดัง Figure 1 และ Figure 2

เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างมีลักษณะทางประชากรศาสตร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ เพศและอายุ การทราบข้อมูลความแตกต่างระหว่างเพศและอายุต่อการเลือกรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคาจะสามารถทำให้พัฒนาผลิตภัณฑ์ได้ตรงตามความต้องการของผู้บริโภคแต่ละกลุ่มได้มากขึ้น จากการวิเคราะห์อิทธิพลของเพศและอายุ ต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์ และราคาของผลิตภัณฑ์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความสอดคล้อง (Correspondence analysis) ประกอบด้วย การทดสอบค่า Pearson Chi-square ร่วมกับการวิเคราะห์แผนภาพความสอดคล้อง (Correspondence map) พบว่า จากการทดสอบค่า Chi-square ปัจจัยด้านเพศไม่มีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบบรรจุภัณฑ์ และราคาของผลิตภัณฑ์ อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (จึงไม่แสดงแผนภาพความสอดคล้อง) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Minooei et *al*.(2015) ซึ่งรายงานว่าเพศไม่มีผลต่อการเลือกรูปแบบบรรจุภัณฑ์อาหาร ส่วนปัจจัยด้านอายุมีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบบรรจุภัณฑ์ และราคาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และผลการวิเคราะห์แผนภาพความสอดคล้อง แสดงดัง Figure 3 และ Figure 4

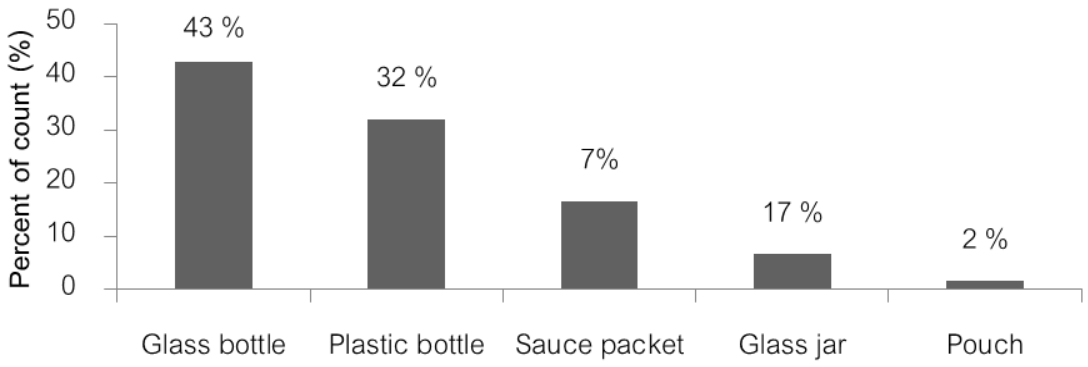


Figure 1 Percent of packaging types were chosen in consumer survey.

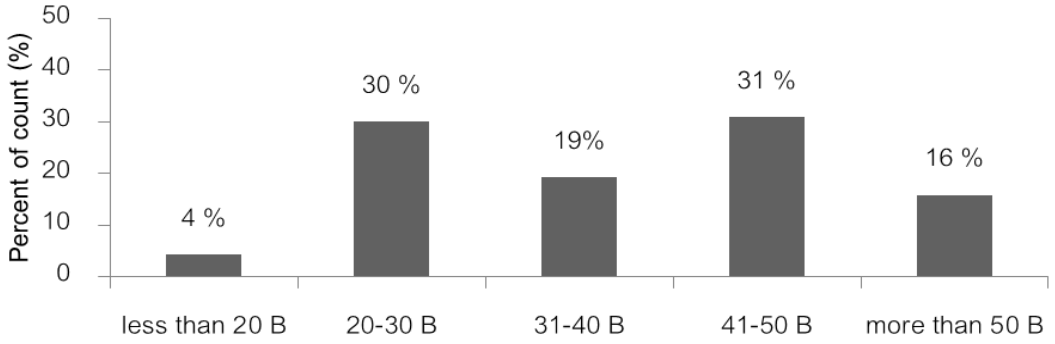


Figure 2 Percent of prices were chosen in consumer survey.

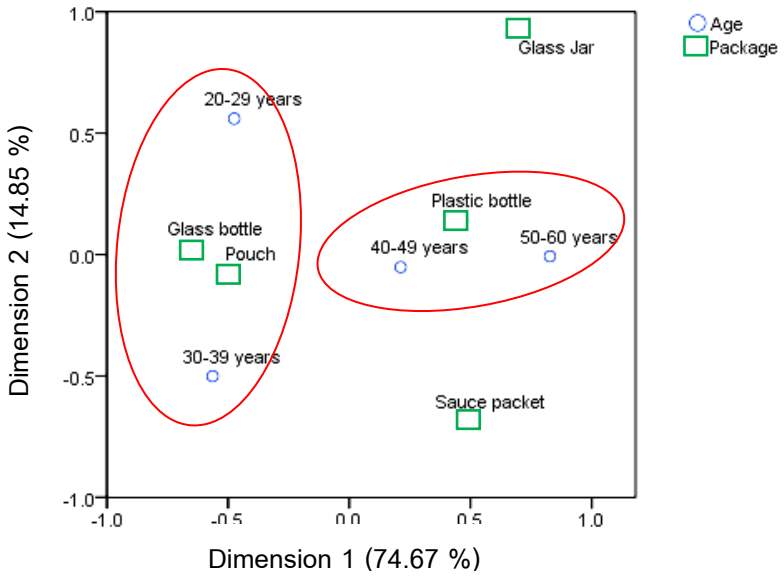


Figure 3 Correspondence mapping of age and packaging type in the first and second dimensions of the correspondence analysis.

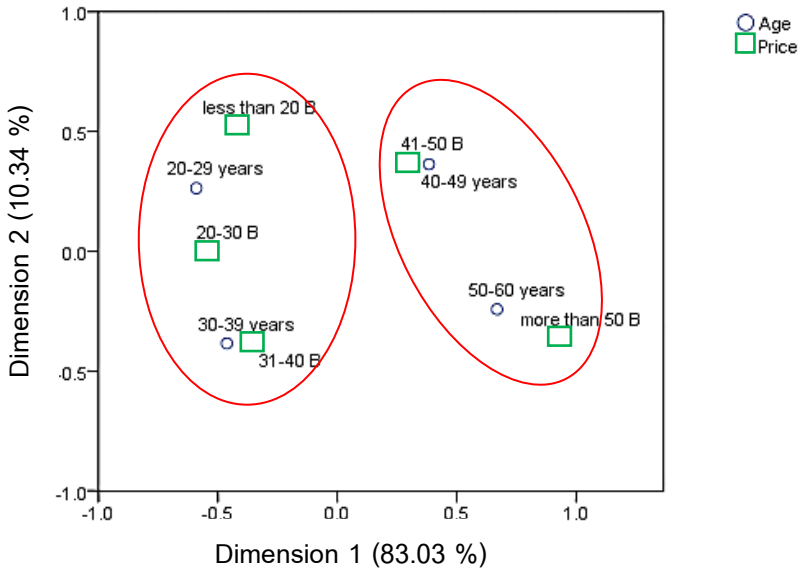


Figure 4 Correspondence mapping of age and price in the first and second dimensions of the correspondence analysis.

อิทธิพลของปัจจัยด้านอายุกับความคิดเห็นด้านรูปแบบบรรจุภัณฑ์ (Figure 3) พบว่า ช่วงอายุ 20-39 ปี จะเลือกเป็นรูปแบบขวดแก้ว ส่วนช่วงอายุ 40-60 ปี จะเลือกเป็นรูปแบบขวดพลาสติก ความแตกต่างของการเลือกรูปแบบบรรจุภัณฑ์ระหว่างอายุ อาจมีผลมาจากเมื่อผู้บริโภคอายุเพิ่มขึ้น อาจมีความต้องการผลิตภัณฑ์ที่หยิบยก สะดวก มีน้ำหนักเบาและไม่ตกแตกง่าย จึงส่งผลให้เลือกบรรจุภัณฑ์เป็นแบบขวดพลาสติกมากกว่า ผลจาก Figure 4 อิทธิพลของปัจจัยด้านอายุกับความคิดเห็นต่อราคาของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใสต่อน้ำหนัก 50 กรัม พบว่า ช่วงอายุ 20-39 ปี จะเลือกราคาอยู่ในช่วงต่ำกว่า 41 บาท ส่วนช่วงอายุ 40-60 ปี จะเลือกราคาอยู่ในช่วงตั้งแต่ 41 บาทขึ้นไป เนื่องจากผู้บริโภคช่วงอายุ 40-60 ปี เป็นกลุ่มผู้ที่มีรายได้สูงมากกว่ากลุ่มอายุน้อย จึงมีอำนาจซื้อมากกว่า จึงส่งผลให้เลือกราคาของผลิตภัณฑ์สูงมากกว่า

สรุป

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อ และอิทธิพลของเพศและอายุต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคาของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดใส โดยการสอบถามผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายอายุ 20-60 ปี ที่รู้จักหรือเคยรับประทานน้ำสลัดใส จำนวน 240 คน พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อ แบ่งได้เป็น 5 ปัจจัย ได้แก่ 1) ปัจจัยด้านยี่ห้อและสถานที่จัดจำหน่าย 2) ปัจจัยด้านการส่งเสริมการขาย 3) ปัจจัยด้านลักษณะของผลิตภัณฑ์ 4) ปัจจัยด้านประโยชน์และความปลอดภัย และ 5) ปัจจัยด้านลักษณะปรากฏ โดยปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค ได้แก่ ปัจจัยด้านคุณภาพและราคา และปัจจัยด้านประโยชน์ต่อสุขภาพและความปลอดภัย ส่วนการศึกษาอิทธิพลของเพศและอายุ ต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคา พบว่า เพศไม่มีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคา ส่วนอายุมีอิทธิพลผลต่อการเลือกรูปแบบบรรจุภัณฑ์และราคา กลุ่มช่วงอายุ 20-39 ปี นิยมเลือกบรรจุภัณฑ์แบบขวดแก้ว และช่วงราคาต่ำกว่า 41 บาท ส่วนกลุ่มช่วงอายุ 40-60 ปี นิยมเลือกบรรจุภัณฑ์แบบขวดพลาสติก และราคาตั้งแต่ 41 บาทขึ้นไป

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2559ก. **การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล**. พิมพ์ครั้งที่ 28, ภาควิชาสถิติ คณะพาณิชย์ศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

_____. 2559ข. **การวิเคราะห์สถิติขั้นสูงด้วย SPSS**. พิมพ์ครั้งที่ 11, ภาควิชาสถิติ คณะพาณิชย์ศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

จิรวรรณ ตั้งไพรฑูรย์ และ ประสพชัย พสุนนท์. 2559. การวิเคราะห์ความสมนัยระหว่างช่วงวัย ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดและความภักดีต่อตราสินค้าร้านขนมหวานจังหวัดเพชรบุรี. **ว. การบัญชีและการจัดการ มหาวิทยาลัยสารคาม** 8 (1): 148-158.

ประสพชัย พสุนนท์, อาฟีฟี ลาเต๊ะ และ เกตุวดี สมบูรณ์ทวี. 2559. การประยุกต์เทคนิคการวิเคราะห์การสมนัยในการวิจัยทางสังคมศาสตร์. **ว. วิทยาลัยบัณฑิตศึกษาการจัดการ มข**. 9 (1): 1-22.

นภวรรณ คณานุรักษ์. 2556. **พฤติกรรมผู้บริโภค**. บริษัท ซีวีแอลการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

วไลภรณ์ สุทธา, สุดจิตร วรรณโชติ และเชาวลิต อุปฐาก. 2554. **น้ำสลัดเพื่อสุขภาพ**. แหล่งที่มา: http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/ 20122141523591.pdf, 8 ธันวาคม 2560.

วิทวัส รุ่งเรืองผล. 2552. **ตำราหลักการตลาด**. พิมพ์ครั้งที่ 5. บริษัท มาร์เก็ตติ้งมูป จำกัด, กรุงเทพฯ.

ลดาวรรย์ . 2558. การศึกษาพฤติกรรม ทัศนคติ ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกซื้อ และความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์เยลลี่ โดยใช้แบบสอบถาม, หน้า 971-977. *ใน* **การประชุมวิชาทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53 (สาขาอุตสาหกรรม เกษตร)**, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Bhattacharyya, P.R. and S. Dasgupta. 2014. Perceptual mapping of consumer: a correspondence analysis approach towards consumers of leather products in Calcutta, India. **J. AFBE** 7 (1): 91-101.

Cooper, D.R. and P.S. Schindler. 1978. **Business research methods**. 6th ed. Irwin McGraw-Hill, Singapore.

Euromonitor International. 2016. **Sauces, dressings and condiments in Thailand**. Available Source: http://www.euromonitor.com/sauces-dressings-and-condiments-in-thailand/report, October 30, 2017.

Phillp, K. 2003. **Marketing Management analysis, planning, implementation, and control**. 9th ed. A Simon & Schuster company, New Jersey

Minooei, O., S. Mokshapathy, M. Zare and M. Zarei. 2015. Importance of food packaging and its relation to the consumer's demographic profile. **International Journal of Business and Management Invention** 4: 8-11.

ผลของสภาวะการสกัดต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารสกัดน้ำสาหร่ายเตา

Effect of the Extraction Conditions on Antioxidant Activity and Total Phenolic Contents of Spirogyra spp. Liquid Extract

พรภัสสร ภัทรศุภา[1] หทัยรัตน์ ริมคีรี[1*] และ พิสิฏฐ์ ธรรมวิถี[1]

Phornphatsorn Phattarasupa[1], Hathairat Rimkeeree[1*] and Pisit Dhamvithee[1]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของสภาวะการสกัดที่มีต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารสกัดน้ำสาหร่ายเตา (*Spirogyra* spp.) สภาวะการสกัดที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ (85, 90 และ 95 องศาเซลเซียส) และเวลา (60, 90 และ 120 นาที) โดยวางแผนการทดลองแบบ 3^2 แฟคทอเรียลในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดโดยวิธี DPPH assay และ ABTS assay คำนวณผลการทดลองเป็นค่า IC_{50} (Half-Maximal Inhibitory Concentration) ประเมินปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (Total phenolic content) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu คำนวนผลการทดลองเป็นค่ามิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิก (GAE) จากการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัดส่งผลให้สารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมเพิ่มมากขึ้นสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตาที่ได้จากการสกัดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาทีแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุดและมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมสูงที่สุดซึ่งมีค่า IC_{50}ของ DPPH assay และ ABTS assay เท่ากับ 130.04±0.55และ47.31±0.68ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และมีสารประกอบฟีนอลิกรวมเท่ากับ 36.07±0.27 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

ABSTRACT

The aim of this study wasto examine the effect of extraction conditions on antioxidant activity and total phenolic contents (TPC) of Spirogyra *spp*. liquid extract. The extraction conditions studied were temperature (85, 90 and 95°C) and times (60, 90 and 120 min.) using 3^2 factorial in CRD experimental design. The extracts were investigated for antioxidant activity using DPPH and ABTS assays and the data were calculated as IC_{50}. The total phenolic content of the liquid extract was determined by the Folin–Ciocalteu method and the data were calculated as gallic acid equivalents (GAE). The results showed that extraction with higher temperature and longer time period resulted in the increase of antioxidant activity and total phenolic content. The spirogyra *spp*. liquid extract using extraction temperature at 95°C for 120min showed the highest antioxidant activity (IC_{50} values of DPPH assay and ABTS assay of 130.04±0.55 and 47.31±0.68µg/ml, respectively) and the highest total phenolic content (36.07±0.27mg GAE/g dry basis).

Key Words: Spirogyra algae, extraction,antioxidant, DPPH assay, ABTS assay, Total Phenolic Content (TPC)

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

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

สาหร่ายเตา หรือ เทา เป็นสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวสด มีลักษณะเป็นเส้นยาว ไม่แตกกิ่งก้าน มีเมือกปกคลุม มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Spirogyra* spp. (สไปโรไจรา) พบในแหล่งน้ำแถบภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีงานวิจัยจำนวนมากพบว่าสารสกัดสาหร่ายเตามีฤทธิ์ทางชีวภาพ แสดงประสิทธิภาพเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) (ยุวดี และคณะ, 2555) อนุมูลอิสระ(free radical) คือสารหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนโดดเดี่ยว (unpaired electron) ซึ่งทำให้โมเลกุลของสารเกิดความไม่เสถียรและมีความว่องไว จึงเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ส่งผลให้อนุมูลอิสระเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วและทำให้ร่างกายเกิดภาวะความเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สามารถทำลายชีวโมเลกุลต่างๆ ทำลายโครงสร้างดีเอ็นเอ (DNA) รวมทั้งเปลี่ยนสภาพโปรตีนและไขมันของเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดโรคเรื้อรังเช่น โรคไขมันในเลือดสูง โรคหัวใจ มะเร็ง รวมทั้งการเสื่อมสภาพความยืดหยุ่นของผิวหนัง (Li *et al*., 2013; Kregel and Zhang, 2007) สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) หรือสารประกอบฟีนอล เป็นสารที่พบได้ตามธรรมชาติในพืช ผัก ผลไม้ สมุนไพร รวมทั้งในสาหร่าย มีงานวิจัยพบว่าการสกัดสาหร่ายด้วยน้ำทำให้ได้สารสกัดที่มีสารประกอบฟีนอลิกซึ่งแสดงคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูง (ยุวดีและคณะ, 2552; วสันต์ และคณะ2558;Ganesan *et al*., 2008; Hu and Kitts, 2000;Nalin *et al*., 2005) ซึ่งปัจจัยและสภาวะที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (ชวนพิศ และคณะ, 2555; Ganesan *et al*., 2011; Turkmen, 2005) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัดต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาซึ่งผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปสู่การพัฒนากระบวนการสกัดที่เหมาะสม เพื่อให้ได้สารสกัดน้ำจากสาหร่ายเตาที่ได้มีศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมสาหร่ายเตา

สาหร่ายเตา *(Spirogyra* spp.) จากหมู่บ้านนาคูหา อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ ล้างด้วยน้ำสะอาด นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 160 นาที ดัดแปลงจาก น้ำฝน (2557) นำสาหร่ายแห้งที่ได้ปั่นด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าจนละเอียด เก็บรักษาผงสาหร่ายเตาในบรรจุภัณฑ์ทึบแสงที่อุณหภูมิ-20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปศึกษาในขั้นต่อไป

การศึกษาสภาวะการสกัดสาหร่ายเตา

ผงสาหร่ายเตาแห้ง 1 กรัม สกัดด้วยน้ำสะอาดปริมาตร 40 มิลลิลิตร โดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดสาหร่ายเตาโดยวางแผนทดลองแบบ 3^2 แฟคทอเรียลในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ปัจจัยที่ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยศึกษา 3 ระดับ คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด ได้แก่ 85, 90 และ 95 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้สกัด ได้แก่ 60, 90 และ 120 นาที (ดัดแปลงจาก ฐิติกานต์, 2551) นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 5,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที (ดัดแปลงจาก Hwang and Thi, 2014) กรองด้วยผ้าขาวบาง 4 ชั้น เก็บรักษาสารสกัดส่วนน้ำที่ได้ในบรรจุภัณฑ์ทึบแสงที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสจนกว่าจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

การทดสอบหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม

ทดสอบหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (Total phenolic contents, TPC) ดัดแปลงวิธีจาก Chan *et al.* (2007) สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้น 7.5% w/v ปริมาตร 1.2 มิลลิลิตรและสารละลาย Folin-Ciocalteu (เจือจาง10 เท่า) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตรใส่ลงในหลอดทดลองที่มีตัวอย่างปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร เขย่าให้สารผสมกันและนำไปบ่มในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับกราฟสารมาตรฐานกรดแกลลิก (gallic acid equivalents, GAE) โดยรายงานผลเป็นค่ามิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (mg GAE/g dry basis)

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH assay (ดัดแปลงจาก Turkmen, 2005) สารละลาย DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ในตัวทำละลายเมทานอล (99.8%, AR grade) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมกับสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาปริมาตร 1 มิลลิลิตร (ความเข้นข้น 0.250, 0.125, 0.100, 0.050 และ 0.025 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) นำไปบ่มในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องมือUV-Vis Spectrophotometer (Shimadzu, A160) ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ใช้ตัวทำละลายเมทานอลเป็นสารละลายอ้างอิง (reagent blank) ตัวอย่างควบคุม (control) คือ สารละลาย DPPH ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมกับเมทานอลปริมาตร1 มิลลิลิตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวนหาร้อยละของการยับยั้ง (%inhibition)

ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS assay (ดัดแปลงจากRe *et al.*,1999) สารละลาย ABTS 7 มิลลิโมลาร์ (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)) และสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟต 2.45 มิลลิโมลาร์ ($K_2O_8S_2$) ผสมในอัตราส่วนที่เท่ากัน นำไปเก็บในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา12 ชั่วโมงได้เป็น Stock ABTS radical cation นำมาเจือจางด้วยตัวทำละลายเอทานอล (99.9%, AR grade) ให้มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.70 (± 0.02) ที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตรโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เริ่มการทดสอบโดยนำสารละลาย ABTS ที่ผ่านการเจือจางปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมกับสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาปริมาตร 1 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 0.100, 0.050, 0.031, 0.025 และ 0.020 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) นำไปบ่มในที่มืดเป็นเวลา 6 นาทีวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 นาโนเมตรใช้ตัวทำละลายเอทานอลเป็นสารละลายอ้างอิง และตัวอย่างควบคุม คือ สารละลาย ABTS ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมกับเอทานอลปริมาตร1 มิลลิลิตร แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวนหาร้อยละของการยับยั้ง (%inhibition)

ค่าร้อยละของการยับยั้ง (%inhibition) ของ DPPH และ ABTS คำนวนจากสมการดังนั้น

$$\text{ค่าร้อยละของการยับยั้ง} = (Abs_{control} - Abs_{sample})/(Abs_{control})*100$$

$Abs_{control}$ = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างควบคุม

Abs_{sample} = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

นำค่าร้อยละของการยับยั้งจากวิธี DPPH assay และวิธี ABTS assay มาคำนวนและรายงานผลการทดสอบเป็นค่า IC_{50} (Half-Maximal Inhibitory Concentration) หมายถึง ค่าความเข้มข้นของสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ทำให้อนุมูลอิสระลดลง50% ดังนั้นหากพิจารณาแล้วพบว่าสารสกัดแสดงค่า IC_{50} น้อยหมายถึงสารสกัดนั้นมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่ดี (Ganesan *et al.*, 2011)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การทดสอบทุกวิธีทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (SPSS Statistics, Version12) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อนำไปวิจารณ์และสรุปผลต่อไป

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการสกัดสาหร่ายเตาที่สภาวะแตกต่างกันต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม

ผลของปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมจากสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาคำนวนจากกราฟมาตราฐานกรดแกลลิก ($y = 0.010x - 0.007$, $R^2 = 0.999$) (Table1) จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัดมีปฏิสัมพันธ์กัน ซึ่งการสกัดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสที่เวลา 120 นาที ส่งผลให้สารสกัดน้ำสาหร่ายเตามีปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมสูงสุด คือ 36.07±0.27 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้งรองลงมาคือสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้จากการสกัดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสที่เวลา 90 และ 60 นาที ซึ่งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม เท่ากับ 33.83±0.25 และ 31.76± 0.21 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ ($p \leq 0.05$)

Table 1 Effect of the extraction conditions on total phenolic contents (TPC, mg GAE/g dry basis) of *Spirogyra* spp.liquidextract.

Temperature (°C)	Time (min)		
	60	90	120
85	16.68 ± 0.13^{cC}	20.47 ± 0.17^{cB}	22.30 ± 0.18^{cA}
90	22.96 ± 0.25^{bC}	23.83 ± 0.21^{bB}	25.96 ± 0.28^{bA}
95	31.76 ± 0.21^{aC}	33.83 ± 0.25^{aB}	36.07 ± 0.27^{aA}

Remark : Data are expressed as means ± SD (n = 3)

^{A,B,C} Means with the different letters in the same row were significant at ($p \leq 0.05$)

^{a,b,c}Means with the different letters in the same column were significant at ($p \leq 0.05$)

Table 1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของสารสกัดน้ำสาหร่ายเตามีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (±5 องศาเซลเซียส) จึงมีความเป็นไปได้ว่าเซลล์ภายในของสาหร่ายเตาไวต่อการกระตุ้นด้วยความร้อน ซึ่งความร้อนสามารถทำลายผนังเซลล์ได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้สารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ภายในเซลล์ของสาหร่ายเตาหลุดออกมาได้มากขึ้น สาหร่ายพวงองุ่นและสาหร่ายเขากวางที่ผ่านการสกัดด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที แสดงปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด เท่ากับ 0.22±0.14 และ 0.06±0.04 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อกรัมของน้ำหนักตัวอย่างแห้ง ตามลำดับ (วสันต์และคณะ, 2557) สาหร่าย *S. hemiphyllum* สกัดด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที มีปริมาณฟีนอลิกรวมเท่ากับ 0.240 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อกรัมของสารสกัด (Hwang *et al*., 2010) ซึ่งแสดงปริมาณฟีนอลิกน้อยกว่าสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด

สาหร่ายของงานวิจัยดังกล่าวมีความสูงกว่าและใช้เวลาในการสกัดใกล้เคียงกับการทดลองครั้งนี้ จึงแสดงให้เห็นว่าการใช้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดส่งผลอย่างยิ่งต่อคุณภาพของสารสกัดที่ได้รับ

มีงานวิจัยพบว่าสาหร่ายเตาที่ผ่านการสกัดด้วยน้ำร้อนแสดงองค์ประกอบเป็นสารประกอบฟีนอลิกหลากหลายชนิด (Duangjai *et al*., 2015) การสกัดส่งผลให้ผนังเซลล์ของสาหร่ายถูกทำลายและแตกออกได้ง่าย เมื่อเวลาที่ใช้ในการสกัดนานขึ้นจึงส่งผลให้สารประกอบฟีนอลิกภายในเซลล์ถูกปลดปล่อยออกมาได้มากขึ้น ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกดังกล่าวเป็นชนิดที่สามารถทนความร้อนได้ดี ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มเวลาในการสกัดส่งผลให้สารสกัดที่ได้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมเพิ่มมากขึ้น (Fu *et al*., 2015) สารสกัดที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมมากจะมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงตามไปด้วย เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติกที่ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งสามารถให้ไฮโดรเจนอะตอมแก่อนุมูลอิสระที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวได้ จึงทำให้อนุมูลอิสระมีความเสถียรและไม่เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังนั้นสารประกอบฟีนอลิกจึงมีความสามารถในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (ชวนพิศ และคณะ, 2555; Hu and Kitts, 2000; Pietta, 2000)

ผลของการสกัดสาหร่ายเตาที่สภาวะแตกต่างกันต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

จากการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH assay (Table2) แสดงให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัด โดยสารสกัดน้ำสาหร่ายเตามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH มากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการสกัด สารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้จากการสกัดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา120 นาที มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH มากที่สุด รองลงมาคือสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้จากการสกัดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที และที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งแสดงค่า IC_{50} เท่ากับ 130.04±0.55, 134.74±0.72 และ 135.84±0.76 ไมโครลิตรกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ($p \leq 0.05$)

Table 2 Effect of the extraction conditions on IC_{50} (µg/ml) by DPPH assay of *Spirogyra* spp. liquid extract.

Temperature (ºC)	Time (min)		
	60	90	120
85	144.83 ± 0.81^{aA}	141.31 ± 0.79^{aB}	137.13 ± 0.43^{aC}
90	140.44 ± 0.59^{bA}	135.74 ± 0.82^{bB}	135.84 ± 0.76^{bC}
95	138.87 ± 0.60^{cA}	134.74 ± 0.72^{cB}	130.04 ± 0.55^{cC}

Remark : Data are expressed as means ± SD (n = 3)

^{A,B,C} Means with the different letters in the same row were significant at ($p \leq 0.05$)

^{a,b,c}Means with the different letters in the same column were significant at ($p \leq 0.05$)

จากการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี ABTS assay (Table3) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัดจะส่งผลให้สารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS มากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัดมีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน โดยพบว่าสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้จากการสกัดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสที่เวลา 120 นาที แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS มากที่สุด รองลงมาคือสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้

จากการสกัดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที และที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งแสดงค่า IC_{50} เท่ากับ 47.31±0.68, 52.11±0.53 และ 53.56±0.23 ไมโครกรัมต่อมิลลลิตรตามลำดับ ($p \leq 0.05$) Hwang and Thi (2014) พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดส่งผลต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดสาหร่ายโดยการสกัดด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สารสกัดสาหร่ายแสดงค่าการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS มากกว่าสารสกัดสาหร่ายที่ได้จากการสกัดที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

Table 3 Effect of the extraction conditions on IC_{50} (µg/ml) by ABTS assay of *Spirogyra* spp. liquid extract.

Temperature (ºC)	Time (min)		
	60	90	120
85	60.81 ± 0.71^{aA}	59.64 ± 0.39^{aB}	57.30 ± 0.25^{aC}
90	57.63 ± 0.22^{bA}	55.77 ± 0.54^{bB}	53.56 ± 0.23^{bC}
95	54.33 ± 0.69^{cA}	52.11 ± 0.53^{cB}	47.31 ± 0.68^{cC}

Remark : Data are expressed as means ± SD (n = 3)

^{A,B,C} Means with the different letters in the same row were significant at ($p \leq 0.05$)

^{a,b,c}Means with the different letters in the same column were significant at ($p \leq 0.05$)

Table 2 และ Table 3 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH radical และ ABTS radical) โดยการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการสกัดส่งผลให้สารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากขึ้นและมีปริมาณฟีนอลิกเพิ่มมากขึ้น (Table1) โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fu *et al*. (2015) ซึ่งพบว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดสาหร่ายมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยายับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH radical และ ABTS radical ได้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง จึงเป็นสาเหตุให้สารสกัดสาหร่ายยังคงแสดงฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระมากแม้ว่าจะใช้อุณหภูมิสูงในการสกัด Kumar*et al*. (2015) ทำการสกัดสาหร่าย Spirogyra *porticalis* โดยใช้น้ำที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส มีค่า IC_{50} โดย ABTS assay และ DPPH assay เท่ากับ 37.71 ± 0.09 และ 8.06±0.10 มิลลิลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ยุวดี และคณะ (2552) ทำการสกัดสาหร่ายน้ำจืดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าสารสกัดน้ำสาหร่ายไกไหม (*Cladophora glomerata*) สาหร่ายไกค่าว *Microspora* และสาหร่ายลอน (*Nostochopsis lobatus*) มีค่า IC_{50}DPPH assay เท่ากับ 10.97, 12.49 และ 29.78 มิลลิลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งสารสกัดน้ำสาหร่ายของงานวิจัยดังกล่าวแสดงความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระน้อยสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาของการทดลองในครั้งนี้ ถึงแม้ว่าการทดลองของ Kumar*et al.* (2015) จะเป็นสาหร่ายในสกุลเดียวกันกับสาหร่ายเตาในงานทดลองนี้ก็ตาม ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสกัดส่งผลอย่างยิ่งต่อความสามารถการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดสาหร่าย

สรุป

จากการศึกษาสภาวะการสกัดสาหร่ายเตาด้วยตัวทำละลายน้ำพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารสกัดน้ำสาหร่ายเตา โดยการเพิ่มอุณหภูมิและการเพิ่มเวลาในการสกัดส่งผลให้สารสกัดน้ำสาหร่ายเตามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่มากขึ้นรวมทั้งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมจะแปรผันตรงตามฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สภาวะที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสาหร่ายเตาในงานวิจัยนี้คืออุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งสภาวะดังกล่าวทำให้สารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้มีมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด ซึ่งอาจนำไปสู่การนำสารสกัดน้ำสาหร่ายเตาที่ได้ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและความงามในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.หทัยรัตน์ ริมคีรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำตรวจสอบแก้ไขงานวิจัยฉบับนี้ และขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านจากภาคพัฒนาผลิตภัณฑ์คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขนที่สนับสนุนการดำเนินงานอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ฐิติกานต์ ปัญโญใหญ่. 2551. **กิจกรรมต้านออกซิเดชันของสาหร่ายเตา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

น้ำฝน ไชยลังกา.2557. **ผลกระทบของสภาวะและวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ยุวดีพีรพรพิศาล, ฐิติกานต์ ปัญโญใหญ่ และดวงพรอมร เลิศพิศาล. 2555. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านการอักเสบของสาหร่ายเตา. **วารสารวิทยาศาสตร์ มข**. 40(1): 238 – 235.

ยุวดี พีรพรพิศาล, ดวงพร อมรเลิศพิศาล, ดวงตา กาญจนโพธิ์, ธวัช แต้โสตถิกุล, ญาณี พงษ์ไพบูลย์ และสุดาพร ตงศิริ. 2552. **ศักยภาพของสาหร่ายน้ำจืดขนาดใหญ่ในการเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและเวชสำอาง**. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. กรุงเทพมหานคร.

วสันต์ สุมินทิลี่, ปนิดา บรรจงสินศิริ, จันทนา ไพรบูรณ์ และวรรณวิมล คล้ายประดิษฐ์. 2557. กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบจากสาหร่ายพวงองุ่น (*Caulerpa lintillifera*) สาหร่ายทุ่น (*Sargassum oligocystum*) และสาหร่ายเขากวาง (*Gracilaria changii*). **วารสารเทคโนโลยีการอาหารมหาวิทยาลัยสยาม**. 9(1): 63 – 75.

Chan, E.W.C., Y.Y. Lim, Y.L. Chew. 2007. Antioxidant activity of Camellia sinensis leaves and teafrom a lowland plantation in Malaysia. **Food Chemistry**.102: 1214–1222.

Duangjai, A., N. Limpeanchob, K. Trisat and D. Amornlerdpison. 2016. *Spirogyra neglecta* inhibits the absorption and synthesis of cholesterol in vitro. **Integrative Medicine Research**. 301-308

Fu, C.W.F.,C.W. Ho, W.T.L. Yong, F. Abas and C.P. Tan. 2015. Effects of phenolic antioxidants extractionfrom four selected seaweeds obtained from Sabah. **PeerJ PrePrints**. 3: e1529.

Ganesan, K., K.S. Kumar and P.V.S. Rao. 2011. Comparative assessment of antioxidant activity in three edible species of green seaweed, Enteromorpha from Okha, Northwest coast of India. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 12: 73–78.

Ganesan, P., S. Chandini, and N. Bhaskar. 2008. Antioxidant properties of methanol extract and its solvent fractions obtained from selected Indian red seaweeds. **Bioresource Technology**. 99: 2717-2723.

Hu, C. and D.D. Kitts. 2000. Studies on the antioxidant activity of Echinacea root extract. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**.48: 1466-1472.

Hwang, P.A., C.H. Wu, S.Y. Gau, S.Y. Chien and D.F. Hwang. 2010. Antioxidant and immune-stimulating activities of hot-water extract from seaweed *Sargassum hemiphyllum*. **J Mar Sci Technol**. 18(1): 41-46.

Hwang, E.S. and N.D. Thi. 2014. The effect of cooking methods on total phenolics and antioxidant activity of selected green vegetables. **Preventive Nutrition and Food Science**. 19(1): 40-48.

Kregel, K.C. and H.J. Zhang. 2007. An integrated view of oxidative stress in aging: basic mechanism functional effects and pathological considerations. **Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol**. 292(1): 18-36.

Kumar, J., P. Dhar, B. Amol, B. Tayade, D. Gupta, O. Chaurasia, D.K. Upreti, K. Toppo, R. Arorac, M.R. Suseela and R.B. Srivastava. 2015. Chemical Composition and Biological Activities of Trans-Himalayan Alga Spirogyra porticalis (Muell.) Cleve. **PLOS ONE**. 10(2): e0118255.

Li, H., S. Horke , U. Förstermann. 2013. Oxidative stress in vascular disease and its pharmacological prevention. **Trends in Pharmacological Sciences**. 34(6): 313-319.

Nalin, S., L.K. Wan and J.Y. Jin. 2005. Radical scavenging potential of hydrophilic phlorotanins of *Hizikia fusiformis*. **Algae**. 20(1):69-75.

Pietta, P.G. 2000. Flavonoids as antioxidants. **Journal of Natural Products**. 63: 1035-1042.

Re, R., N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang and C.R. Evans. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology & Medicine**. 26: 1231–1237.

Turkmen, N., F. Sari and Y.S. Velioglu, 2005. The effect of cooking methods on total phenolics and antioxidant activity of selected green vegetables. **Food Chemistry**. 93(4): 713-718.

Zhang, D. and Y. Hamauzu. 2004. Phenolics, ascorbic acid, carotenoids and antioxidant activity of broccoli and their changes during conventional and microwave cooking. **FoodChemistry**. 88:503–509.

การทำนายคุณภาพภายในของมะม่วงเขียวเสวยด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟาเรดแบบพกพา

Prediction of Internal Quality Parameters of Mango (*Mangifera indica* L. var. Khiew Sawoey) Using Portable near Infrared Spectrometer

ดวงกมล ด่านขับต้อน[1*] ธงชัย สุวรรณสิชณน์[1] ศุมาพร เกษมสำราญ[2] และ สุรศักดิ์ เชียงกา[3]

Duangkamon Dankhabton[1*], Thongchai Suwonsichon[1], Sumaporn Kasemsumran[2] and Surasak Chiangga[3]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เครื่องสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟาเรดแบบพกพาในการทำนายคุณภาพของมะม่วงเขียวเสวยจำนวน 240 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นกลุ่มสร้างสมการจำนวน 168 ตัวอย่างและกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องในการทำนาย 72 ตัวอย่าง นำตัวอย่างทั้งหมดมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 588-1100 นาโนเมตร และปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับสอง จากนั้นนำมาวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและความแน่นเนื้อ เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมกับข้อมูลทางเคมีและกายภาพของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ มาวิเคราะห์หาสมการทำนายด้วยวิธีสมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (The partial least square regression; PLSR) ผลการศึกษาพบว่าสมการ PLSR ที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R_{Cal}) อยู่ในช่วง 0.86-0.87 และเมื่อนำสมการ PLSR ไปใช้ในการทำนายในกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (Root mean square error of prediction, RMSEP) น้อยกว่า 2.89 และมีค่า (Ratio of standard error of prediction to standard deviation, RPD) มากกว่า 1.65

ABSTRACT

The objective of this study was to apply portable near infrared spectrometer (NIRS) for predicting quality parameters of mango (*Mangifera indica* L. var. Khiew Sawoey). Two hundred forty mangoes were divided into 2 sets as calibration set (n=168) and validation set (n=72). All samples were determined by portable NIRS in the wavelength region of 588-1100 nm. All spectra were pretreated by the second derivative before developing model. After NIR measurements, all sample were determined the total soluble solid (TSS) and firmness. The spectra TSS and firmness data of calibration set were used to generate the predictive models developed by partial least square regression (PLSR). The result showed that the PLSR models provide R_{Cal} in the range of 0.86-0.87. PLSR models were also applied to find out their performance in validation data set. Result showed that all PLS models were suitable with providing the root mean square error of prediction (RMSEP) lower than 2.89 and the ratio of standard error of prediction to standard deviation (RPD) greater than 1.65 can be applied to predict.

Key Words: mango (Khiew Sawoey), portable near infrared spectrometer, total soluble solid (TSS), firmness

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

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900 Thailand

[2]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Kasetsart Agricultural and Agro-Industry Product Improvement Institute (KAPI), Kasetsart University, Bangkok 10900 Thailand

[3]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

มะม่วงเขียวเสวย (*Mangifera indica* L. var. Khiew Sawoey) เป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย จากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2560) ในช่วงเดือนมกราคมถึงตุลาคม ปี พ.ศ. 2560 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกมะม่วงเขียวเสวย 3.2 หมื่นตัน คิดเป็น มูลค่า 1,543 ล้านบาท ตลาดส่งออกที่สำคัญได้แก่ ญี่ปุ่น มาเลเซีย และเวียดนาม (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 2556) โดยมะม่วงเขียวเสวยจะนิยมส่งออกเป็นผลสด เนื่องจากมี รสชาติหวานมัน อมเปรี้ยวเล็กน้อยและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง (มนตรี, 2556) สามารถรับประทานได้ทั้งผลดิบและผลสุก แต่ส่วนใหญ่นิยมรับประทานผลดิบ (วิจิตร, 2529) จึงทำให้มะม่วงเขียวเสวยได้รับความสนใจจากผู้บริโภค จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามะม่วงเขียวเสวยเป็นผลไม้ที่สามารถสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรและเพิ่มมูลค่าการส่งออกให้กับประเทศ ดังนั้นในการส่งออกมะม่วงเขียวเสวยจึงต้องมีการควบคุมคุณภาพในการส่งออก

ปัจจุบันการความคุมคุณภาพการส่งออกของมะม่วงเขียวเสวยโดยทั่วไป ใช้ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ในการคัดคุณภาพ ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของคุณภาพมะม่วงสดและอาจเกิดความผิดพลาดได้ นอกจากนี้ยังใช้วิธีการตรวจสอบทางเคมีและกายภาพ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ทำลายตัวอย่าง ใช้เวลานาน, สิ้นเปลือง, เครื่องมือวิเคราะห์มีราคาแพงและไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการนำเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟาเรด (Near Infrared Spectroscopy; NIRS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่รวดเร็ว แม่นยำ ประหยัดแรงงาน ช่วยลดต้นทุนการผลิต เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและไม่ทำลายตัวอย่าง มาใช้ในการควบคุมคุณภาพการส่งออกของมะม่วงเขียวเสวย โดยจากงานวิจัยของ Saranwong และคณะ (2004), Mahayothee และคณะ (2002) และ Rungpichayapichet และคณะ (2016) ได้ใช้เทคนิค NIR ตรวจสอบค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Total Soluble Solid: TSS) ปริมาณกรด (Titratable acidity: TA) วัตถุแห้ง (dry matter, DM)และความแน่นเนื้อ (Firmness) ของมะม่วงน้ำดอกไม้

อย่างไรก็ตามยังมีรายงายวิจัยจำนวนน้อยที่ศึกษาการวัดคุณภาพด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงเขียวเสวย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อใช้เครื่องสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟาเรดแบบพกพาในการทำนายคุณภาพของมะม่วงเขียวเสวย ทั้งนี้ผลจากรายงานการวิจัยจะสามารถช่วยควบคุมคุณภาพในการส่งออกมะม่วงเขียวเสวยไปยังตลาดต่างประเทศให้ตรงตามความต้องการของผู้บริโภคและเป็นการส่งเสริมการใช้เครื่องสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟาเรดแบบพกพาไปใช้ในภาคเกษตรกรรมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. วัตถุดิบ

มะม่วงเขียวเสวยจากสวนในจังหวัดฉะเชิงเทรา เดือนสิงหาคม ปี พ.ศ. 2559 ถึงเดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2560 คัดมะม่วงที่มีอายุตั้งแต่ 90 – 115 วัน หลังจากการออกดอก(ธนะชัย,2531) จำนวน240 ตัวอย่าง ขนาด 250-400 กรัม และเก็บรักษาที่ห้องเย็นด้วยอุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์จะต้องนำมะม่วงมาวางที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแบ่งมะม่วงออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่ม สร้างสมการ (Calibration) จำนวน 168 ตัวอย่าง และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation) จำนวน 72 ตัวอย่าง จากนั้นนำมะม่วงทั้ง 240 ตัวอย่างมาตรวจวัดค่าคุณภาพทางเคมีและกายภาพ ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่

ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid; TSS) และความแน่นเนื้อ (Firmness) ด้วยวิธีมาตรฐานและวัดค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่อง FQA-NIR GUN แบบพกพา โดยทำการประเมินตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2. การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง FQA-NIR GUN แบบพกพา

มะม่วงทั้ง 240 ตัวอย่างที่เก็บรักษาในห้องเย็นด้วยอุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียสจะถูกนำมาวางที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นมะม่วงจะถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียสด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (cooling bath) เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำมะม่วงมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยครื่อง FQA-NIR GUN (Figure 1) ด้วยหลักการอินเตอร์แอคแทนซ์ (Interactance) ที่ช่วงความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร ถึง 1100 นาโนเมตร โดยจะสแกนบริเวณตรงส่วนแก้มของมะม่วง 3 ซ้ำ จากนั้นทำการบันทึกค่าการดูดกลืนแสง (log 1/R) ทุก 2 นาโนเมตร และถ่ายโอนข้อมูลสเปกตรัมแบบ JCAM.DX สู่โปรแกรม Unscrambler version.8.0 ซึ่งสเปกตรัมที่ได้ (Raw Spectrum) จากนั้นนำมาผ่านการปรับแต่งสเปกตรัม (Pretreatment) 3 วิธี ได้แก่ 1) วิธี Savitzky-Golay smoothing 2) วิธี Multiplicative scatter correlation (MSC) และวิธีอนุพันธ์อันดับสอง (Second derivative) เพื่อลดผลกระทบจากการกระเจิงแสงของตัวอย่าง ขนาดตัวอย่างไม่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดแสง เป็นต้น (อนุพันธ์,2545) ก่อนนำค่าดังกล่าวไปสร้างสมการทำนายต่อไป

3. การวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพเพื่อหาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid; TSS) และความแน่นเนื้อ (Firmness) ของมะม่วงเขียวเสวยด้วยวิธีมารตฐาน

ตัวอย่างมะม่วงเขียวเสวยที่ผ่านการวัดด้วยเครื่อง FQA-NIR GUN แบบพกพา จากข้อ 2 นำมาวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและความแน่นเนื้อ

3.1 วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid; TSS) นำมะม่วงที่ได้จากการทดลองที่ผ่านข้อ 2 มาฝานครึ่งและทำการปอกเปลือกมะม่วง จากนั้นนำไปคั้นโดยใช้เครื่องคั้นน้ำผลไม้แบบแยกกาก นำน้ำมะม่วงมากรองผ่านผ้าขาวบางและนำมาวัดค่า TSS ด้วยเครื่อง Pocket refractometer (PAL-, ATAGO, Japan) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยก่อนวัดทำการปรับค่าสเกลให้เป็นศูนย์ก่อนด้วยน้ำกลั่นแล้วจึงหยดน้ำมะม่วงที่คั้นลงบนเครื่อง Refractometer และบันทึกผลการวัดค่าที่อ่านได้เป็นค่า ^{O}Brix ทำการประเมินตัวอย่างละ 3 ซ้ำ (Jha *et al*., 2006)

3.2 วัดค่าความแน่นเนื้อ นำมะม่วงมาฝานครึ่งโดยไม่ทำการปลอกเปลือก ทำการวัดที่บริเวณแก้มของมะม่วงทั้งสองข้างจำนวน 3 ซ้ำ ด้วยเครื่อง Lloyd (TA 500, Surry UK) โดยใช้หัววัดสแตนเลสรูปทรงกระบอก (stainless steel probe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัด 8 มิลลิเมตร ตั้งค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ 25 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะทางในการกด 10 มิลลิเมตร โดยค่าความแน่นเนื้อที่ได้ คือความชันของเส้นกราฟระหว่างค่าแรงกับระยะทาง บันทึกค่าในหน่วย (N/mm) (Jha *et al*., 2010)

4. การสร้างสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid; TSS) และความแน่นเนื้อ (Firmness) ของมะม่วงเขียวเสวยด้วยเครื่อง FQA-NIR GUN

ชุดข้อมูลสเปกตรัมจากข้อ 2 และชุดข้อมูลค่าคุณภาพทางเคมีและกายภาพจากข้อ 3 ของมะม่วงเขียวเสวย 240 ตัวอย่าง มาแบ่งเป็นชุดสร้างสมการ (calibration: n=168) และชุดตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation: n=72) โดยนำข้อมูลชุด calibration มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Unscramble version 8.0 ด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยบางส่วนกำลังสองน้อยที่สุด (PLSR) นำสมการที่ได้ไปใช้ทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและความแน่นเนื้อของตัวอย่างในกลุ่ม validation โดยสมการที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R), ค่าความคลาดเคลื่อน (RMSEP), และค่า The ratio of standard error of prediction to standard deviation (RPD) ตามวิธีของ Marques *et al*. (2015) ที่ประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS ทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และรายผลเป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R)และค่าความคลาดเคลื่อน (RMSEP)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการศึกษาค่าคุณภาพทางเคมีและกายภาพของมะม่วงเขียวเสวย

ตัวอย่างมะม่วงพันธุ์เขียวเสวย 240 ตัวอย่างถูกนำมำแบ่งเป็นกลุ่ม Calibration และ Validation ในอัตราส่วน 70% ต่อ 30% แล้ววิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีมาตรฐาน ข้อ 3 โดยศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพ คือ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid; TSS) และความแน่นเนื้อ (Firmness) จากค่าทางสถิติเบื้องต้นดังแสดงใน Table 1 พบว่า ตัวอย่างมะม่วงเขียวเสวยมีความแตกต่างกันในด้านเคมีและกายภาพ โดยพิจารณาได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(S.D.)และช่วงข้อมูลของแต่ละค่าคุณภาพ โดยตัวอย่างมะม่วงเขียวเสวยในกลุ่ม Calibration มีค่าคุณภาพเคมีและกายภาพครอบคลุมค่าเคมีและกายภาพในกลุ่มตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบความสามารถของสมการ (กลุ่ม Validation) โดยตัวอย่างทั้งสองมีการกระจายตัวของค่าคุณภาพทางเคมีและกายภาพใกล้เคียงกัน

Table 1. Summary statistics of Khiew Sawoey mango fruit in calibration and validation sets

Quality parameters	Calibration set (n=168)			Validation set (n=72)		
	Mean	S.D.[a]	Range	Mean	S.D.[a]	Range
Total soluble solid (^{O}Brix)	12.59	3.79	4.60-21.30	12.65	3.33	5.10-19.70
Firmness (N/mm)	12.45	5.54	2.01-22.54	12.60	5.12	2.74-19.70

[a] S.D. standard deviations calculation from a set of sample with total soluble solid and firmness.

2. การวัดค่าดูดกลืนแสงของมะม่วงเขียวเสวย

สเปกตรัมการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างมะม่วงเขียวเสวยด้วยเครื่อง FQA-NIR GUN ที่ช่วงความยาวคลื่น 588-1100 นาโนเมตร โดยเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีต่างๆจะถูกนำมาสร้างสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและความแน่นเนื้อ นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบทางสถิติด้วยวิธี t-test แสดงดัง Table 2 จากตารางพบว่า วิธีการปรับแต่งสเปกตรัมไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ($p>0.05$) จึงเลือกวิธีอนุพันธ์อันดับสอง (Second derivative) เนื่องจากให้ค่า R_{Cal} สูงสุด และค่า RMSEC ต่ำสุด เมื่อเทียบกับการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีอื่นๆ โดยที่ค่า R เข้าใกล้ 1 มากจะบ่งบอกถึง

ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมกับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความแน่นเนื้อว่ามีความสัมพันธ์กันมากและค่า RMSEC ต่ำสุดจะสามารถบอกถึงความคลาดเคลื่อนของสมการโดยที่ค่า RMSEC เข้าใกล้ 0 มากแสดงว่าสมการมีความผิดพลาดน้อย และนอกจากนี้วิธีอนุพันธ์อันดับสองยังสามารถแก้ปัญหาการซ้อนทับกันของจุดยอด (อนุพันธ์, 2545) ทำให้เห็นพีคได้ชัดเจนมากขึ้นอีกด้วย แสดงใน Figure 1a และ Figure 1b ก่อนการปรับแต่งสเปกตรัม และหลังการปรับแต่งด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับสอง ตามลำดับ ซึ่งจากภาพ Figure 1a จะเห็นว่า ที่ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 680-940 นาโนเมตรมีจุดยอดเป็นจุดเดียวกันแต่เมื่อทำการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับสอง แสดงใน Figure 1b จะทำให้สามารถแยกพีคได้ชัดเจนมากขึ้น

Table 2 The result of Spectra pretreatment for TSS and Firmness in Khiew Sawoey mango.

Parameter	Spectra pre- treatment	Factor	Calibration set		Validation set		
			R_{cal}^{ns}	$RMSEC^{ns}$	R_{val}^{ns}	$RMSEP^{ns}$	RPD^{ns}
TSS	No treatment	8	0.83	2.19	0.81	2.02	1.65
(^{O}Brix)	smoothing	9	0.83	2.20	0.81	2.01	1.66
	MSC	8	0.82	2.25	0.81	2.00	1.67
	Second derivative	***8***	***0.87***	***1.97***	***0.81***	***2.02***	***1.65***
Firmness	No treatment	10	0.83	3.14	0.83	2.88	1.78
(N/mm)	Savitzky-Golay	10	0.83	3.18	0.82	2.93	1.75
	MSC	9	0.84	3.13	0.83	2.86	1.79
	Second derivative	***10***	***0.86***	***2.91***	***0.83***	***2.89***	***1.77***

ns : not significant different ($p>0.05$)

F: Number factor

R_{cal}: correlation coefficient of calibration, RMSEC: root mean square error of calibration

R_{val}: correlation coefficient of validation, RMSEP: root mean square error of validation

RPD: ratio of standard error of prediction to standard deviation

The bold italic values indicate the suitable PLS pretreatment models used for TSS and Firmness.

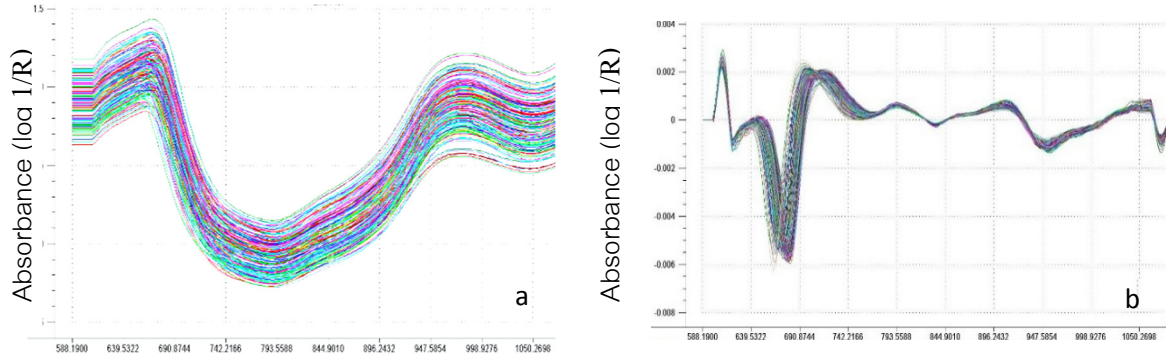


Figure 1 The original spectra (a) and Second derivative spectra (b) of Khiew Sawoey.

3. การสร้างสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและความแน่นเนื้อด้วยวิธี PLSR

หลังจากทำการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับสอง และสร้างสมการด้วยวิธีสมการถดถอยบางส่วนกำลังสองน้อยที่สุด (partial least square regression, PLSR) โดยใช้ข้อมูลในกลุ่ม Calibration set พบว่า สมการ PLSR ที่ได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R_{Cal}) อยู่ในช่วง 0.86-0.87 และค่า RMSEC อยู่ในช่วง 2.19-3.09 แสดงดัง Table 2 จากนั้นนำสมการที่สร้างไปตรวจสอบความแม่นยำในกลุ่ม Validation set พบว่า สามารถทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของมะม่วงเขียวเสวยแสดงใน Figure 2a โดยมีค่า R_{Val} และค่า RPD เท่ากับ 0.81 และ 1.65 ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย (Regression coefficient) ในช่วงความยาวคลื่น 588-1100 นาโนเมตร ดังแสดงใน Figure 2b พบว่า มีความยาวคลื่นที่ 900,913,930,1015 และ1056 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด โดยส่วนใหญ่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้จะมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก (Schmilovitch *et al*, 2000) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านรสหวาน (องค์อร, 2553) และที่ตำแหน่งความยาวคลื่นดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของน้ำตาล คือ หมู่ CH_2และCH_3 ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ (Subedi *et al*, 2011) และที่ความยาวคลื่น 760 และ970 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างน้ำ (Saranwong *et al*, 2004) และ (Osborne *et al*, 1981) ส่วนสมการที่ใช้ทำนายความแน่นเนื้อมีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน โดยมีค่า R_{Val} และ RPD เท่ากับ 0.83 และ 1.77 ตามลำดับ แสดงใน Figure 3a และเมื่อทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย (Regression coefficient) ในช่วงความยาวคลื่น 588-1100 นาโนเมตร ดังแสดงใน Figure 3b พบว่า มีความยาวคลื่นที่ 760 และ970 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับ –OH และที่ความยาวคลื่น 720,900 และ930 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับหมู่ CH_3และCH_2 นอกจากนี้ยังพบที่ความยาวคลื่น 990 นาโนเมตรมีความสัมพันธ์กับโมเลกุลของ Starch (Valente *et al,* 2009) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความแน่นเนื้อ โดยปกติเนื้อผลไม้จะนิ่มเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลต่างๆ ภายในผนังเซลล์ โดยเฉพาะเพคติน แต่นอกจากนั้นยังเกิดจากการที่แป้งเริ่มเปลี่ยนเป็นน้ำตาล และเกิดการสูญเสียน้ำออกไปจากผล จึงทำให้เนื้อผลไม้นิ่มเมื่อผลไม้สุกมากขึ้นจึงทำให้ปริมาณแป้งลดลงไปด้วย (Phabha and Bhagyalaksmi, 1998) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า R_{Val} จากข้อมูลข้างต้นยังสามารถชี้ให้เห็นว่าสมการที่ได้สามารถนำไปใช้เพื่อแบ่งระดับปริมาณหรือประมาณค่าเบื้องต้นได้ (Williams *et al*, 2007) และ Sensitivity ของการทำนายสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 4.60±2.02 ส่วน Sensitivity ของการทำนายสมการทำนายความแน่นเนื้อมีค่าเท่ากับ 2.01±2.89 โดยใช้ค่า Range ต่ำที่สุดของสมการบวกลบค่า RMSEP ที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของสมการทำนาย

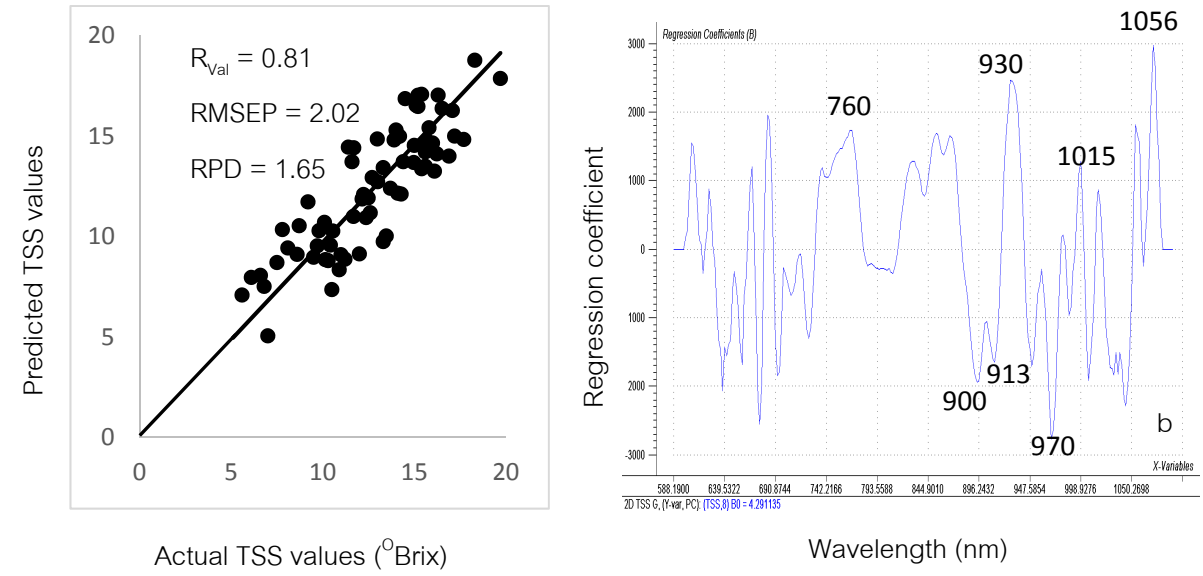


Figure 2 Predicted result (predicted vs. actual) (a) and Regression coefficient (b) for TSS in Khiew Sawoey mango.

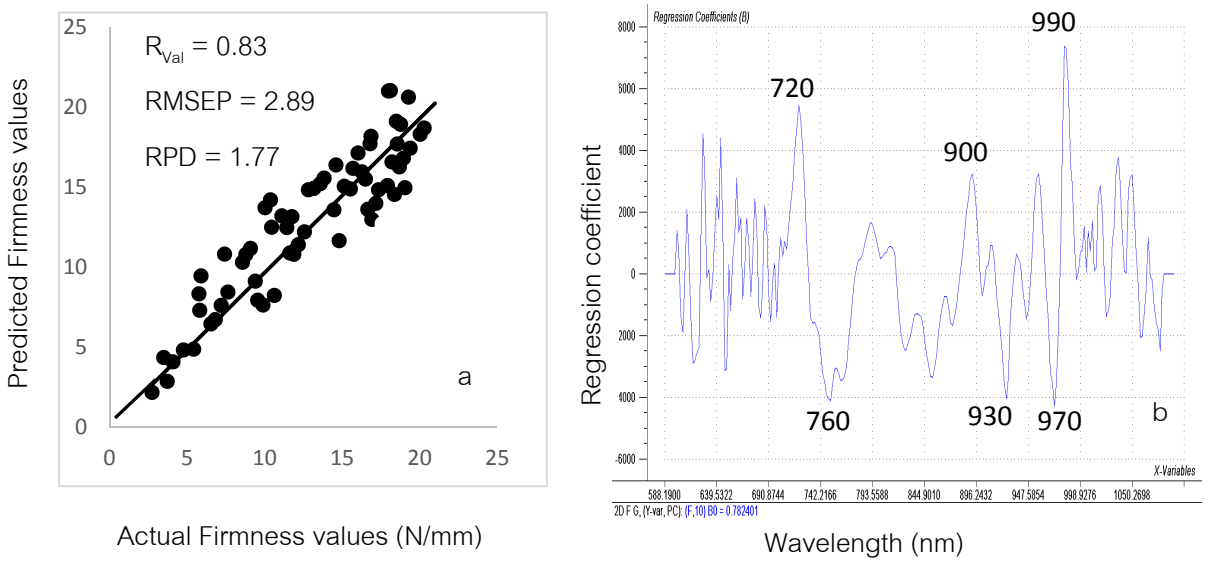


Figure 3 Predicted result (predicted vs. actual) (a) and Regression coefficient (b) for Firmness in Khiew Sawoey mango.

สรุป

การวัดค่าคุณภาพภายในของมะม่วงเขียวเสวยด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟาเรดแบบพกพา (FQA-NIR GUN) มาสร้างสมการในการทำนายคุณภาพของมะม่วงเขียวเสวยซึ่งประกอบไปด้วย สมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและความแน่นเนื้อด้วยวิธี PLSR ชี้ให้เห็นว่า เครื่องสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟาเรดแบบพกพา(FQA-NIR GUN) สามารถทำนายคุณภาพภายในของมะม่วงเขียวเสวยได้ในระดับการคัดเลือกเบื้องต้น แสดงว่าเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟาเรดสามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดคุณภาพของผลไม้ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนเครื่องสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟาเรดแบบพกพา(FQA-NIR GUN) ในการทำวิจัยและขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยประเภททุนบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2560

เอกสารอ้างอิง

ธนะชัย พันธุ์เกษมสุข. 2531. **การเจริญเติบโต ดัชนีการเก็บเกี่ยว การชะลอและเร่งการสุกของผลมะม่วง (Mangifera indica L.) พันธุ์เขียวเสวย**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.

วิจิตร วังใน. 2529. **มะม่วง**. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มนตรี นันทสิทธิ์. 2556. **การปลูกมะม่วง**. ธนธัชการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ศูนย์วัฒนธรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.2556. **มะม่วงการผลิตและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว**. พิมพ์ครั้งที่ 1. วนิดาการพิมพ์, เชียงใหม่.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, **ระบบแสดงข้อมูลทางสถิติ เรื่อง สถิติการส่งออก (Export) มะม่วงสด**, เข้าถึงเมื่อ 31 ตุลาคม 2560, เข้าถึงได้จาก http://www.oae.go.th/oae_report_ import/export_ result. Php.

องค์อร กล่ำเจริญ. 2553. **การทำนายสมบัติทางประสาทสัมผัสของมะม่วงสุกด้วยเทคนิคสเปกโตร สโกปีย่านใกล้อินฟาเรด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2545. การปรับแต่งสเปกตรัม. น. 67-98. ใน วารุณี ธนะแพสย์, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล และธงชัย สุวรรณสิชณน์, บรรณาธิการ. **การอบรมเชิงปฏิบัติการ การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near infrared spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก**. 27-28 พฤศจิกายน 2545. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Jha, S.N., A.R.P. Kingsly and S. Chopra. 2006. Physical and mechanical properties of mango during growth and storage for determination of maturity. **Journal of Food Engineering.** 72: 73-76.

Jha, S.K., S. Sethi, M. Srivastav, A.K. Dubey, R.R. Sharma, D.V.K. Samuel and A.K. Singh. 2010. Firmness characteristics of mango hybrids under ambient storage. **Journal of Food Engineering.** 97: 208-212.

Marques, E. J. N., de Freitas, S. T. and Pimentel, M. F. 2016. Rapid and nondestructive determination of quality parameters in the ‘Tommy Atkins’ mango using a novel handheld near infrared spectrometer. **Food Chemistry**. 197: 1207–1214.

Mahayothee, B., Leitenberger, M., Neidhart, S., Mühlbauer, W. and Carle, R. 2002. "Non-destructive determination of fruit maturity of Thai mango cultivars by near infrared spectroscopy". **In Proceeding of an International Symposium Sustaining Food Security and Managing Natural Resources in Southeast Asia.** Challenges for the 21st Century, January 8-11, 2002, Chiang Mai, Thailand.

Osborne, B. G. 1981. Principles and practice of near infra-red (NIR) reflectance analysis. **Journal of Food Technology.** 16: 13-19.

Phabha, T. N. and N. Bhagyalaksmi. 1998. Carbohydrate metabolism in ripening banana fruit. **Phytochemistry.** 48(6): 915-920.

Rungpichayapichet, P., Mahayothee, B., Nagle, M., Khuwijitjaru, Pramote and Müller, Joachim. 2016. Robust NIRS models for non-destructive prediction of postharvest fruit ripeness and quality in mango. **Postharvest Biology and Technology.** 111: 31–40.

Saranwong, S., J. Sornsrivichai and S. Kawano. 2004. Prediction of Ripe-Stage Eating Quality of Mango Fruit from Its Harvest Quality Measured Nondestructively by near Infrared Spectroscopy. **Postharvest Biology and Technology**. 31(2): 137-145.

Subedi, P.P., K.B. Walsh and G. Owens. 2011. Assessment of sugar and starch in intact banana and mango fruit by SWNIR spectroscopy. **Postharvest Biology and Technology**. 62: 238-245.

Schmilovitch, Ze'ev., A Mizrach, A. Hoffman, H. Egozi, Y. Fuchs. 2000. Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. **Postharvest Biology and Technology.** 19: 245-252.

Valente, M., R. Leardi, G. Self, G. Luciano and J.P. Pain. 2009. Multivariate calibration of mango firmness using vis/NIR spectroscopy and acoustic impulse method. **Journal of Food Engineering**. 94: 7-13.

Williams, P. 2007. **Near-infrared Technology Getting the Best Out of Light.** PDK Grain, Canada.

Formulation of Bael Tea with Aloe Vera and its Physiochemical Changes after Thermal Processing

Atittaya Tandhanskul[1*] and Clara Stella Renata Widianarko[1]

ABSTRACT

The presence of bael tea or Nam Matoom is difficult to be found despite the current highly competitive herbal beverage market. It is possible that there are physiochemical changes in the tea during storage. The aim of this experiment was to develop the bael tea incorporated with aloe vera, along with monitoring the changes occurred after thermal processing during two weeks' storage test. The bael tea with aloe vera were sterilized at 121°C for 15 minutes and then stored at ambient temperature and 4°C. There were seven parameters observed after heat treatment, which were sensory evaluation, pH, total titratable acidity, total soluble solids (Brix°), reducing sugar, and color measurement. From the development of bael tea with aloe vera, using sensory evaluation, the bael tea with aloe vera contained 84% water, 8% sugar, 5% aloe vera, and 3% bael. During storage test, it was observed that the overall liking from sensory evaluation of storage test was decreasing on day 14 due to the loss structure of aloe vera (8.3 to 7.7; from like very much to like moderately). The pH, total soluble solids, and color measurement (L*, a*, b*) were significantly different during storage period and storage condition ($p<0.05$). Different storage temperature did not affect the total titratable acidity and reducing sugar ($p>0.05$). After passing thermal processing, according to this experiment, the bael tea with aloe vera could be kept for 10 days, preferably at 4°C. It was suggested that the bael tea with aloe vera should be stored at 4°C since there was less fluctuation in all parameters measured and less color changes compared to sample stored at ambient temperature.

Key Words: bael, herbal tea, functional drink

*Corresponding author; e-mail address: atittayatnd@au.edu

[1]Department of Food Technology, Faculty of Biotechnology, Assumption University, Bangkok, 10240

INTRODUCTION

In Thailand, the functional food and beverage market is growing vastly due to the demand of healthy lifestyle and the awareness of herbal benefits to one's health. Functional food and beverages are foods or beverages that have a potentially positive effect on health beyond basic nutrition (Zeratsky, 2015). One example of functional foods and beverages includes the herbal tea products. Thai people are fond of herbal teas for medical therapy, as a food supplement or for refreshing effect. Some of the popular herbal teas are chrysanthemum tea, lemongrass tea, roselle tea, and bael tea. These teas are believed to improve health conditions and prevent diseases. Therefore, the need for herbal tea is getting more popular, which reflects in the expansion of the ready-to-drink tea market.

Herbal tea is a beverage made from steeping or boiling herbs, or the herbs used to make such a beverage, which do not come from the *Camellia sinensis* plant (Goodwin, 2016). Bael tea or Nam Matoom is usually consumed due to its herbal properties and refreshing fragrance. Bael tea is made from the slices of bael fruit (*Aegle marmelos* L. Correa), which is originated from India and grows along southeastern Asian countries. It is renowned for its medical beneficial properties, such as diarrhea, dysentery, and other stomach ailments, yet the true mechanism is not widely known (Singh *et al*., 2014).

Thermal processing in beverage production are mainly pasteurization and sterilization. They have been used extensively to achieve the shelf-life stability of beverages, although it can reduce the product quality and freshness, which may not be acceptable from consumer point of view. In Thailand, bael tea is available in powder form, ready-to-serve (RTS), and ready-to-drink (RTD). However, there is no novel product of bael tea that utilizes other ingredients to make it into functional beverage. Therefore, more product development of bael tea is needed in order to increase the value to the bael tea. This study aims to develop a healthier bael tea by the addition of aloe vera and to elevate the consumers' awareness of bael tea. Also, it is to monitor the critical changes in the product after thermal processing.

MATERIALS AND METHODS

1. Preparation of bael tea and the heat treatment

The sliced dried bael fruits, sugar, and canned aloe vera were procured from the local market of Bangkok. The dried bael fruit was roasted in the oven for 5 minutes at 120^{o}C and the fruits were crushed to small pieces, adding into boiling water. The mixture was continued to boil for 10 minutes. The cheesecloth and strainer were sterilized before used to filter the bael tea. Then, the tea was filtered, sugar and ½ -by-½ inch aloe vera pieces were added. Then 270-ml of the bael tea was hot-filled into sterilized 300 ml-glass bottle, considering 7% headspace for in-bottle sterilization (Rodwell, UK). The samples were sterilized for 15 minutes at 121^{o}C and cooled down to ambient temperature using water bath. Then, the samples were stored at ambient temperature and 4^{o}C for further observation.

2. Determination of bael concentration and sweetness in bael tea

This experiment was designed and analyzed using randomized complete block design and Duncan's multiple range test at 95% confidence level by SAS program. Different concentrations of bael fruit in bael tea was determined and judged by using 9-point hedonic scale in which color, aroma, flavor, sweetness, aftertaste, and overall liking were used as attributes to measure. The amount of sugar in the tea was fixed at 2% while the amount of bael fruit was varied at 1.5%, 2%, 2.5%, 3%, and 3.5%(w/v).

Sweetness level was evaluated and analyzed using randomized block design and Duncan's multiple range test at 95% confidence level by SAS program. The bael tea contained 3% of bael fruit, 5% aloe vera, and different amount of sugar, which was 0%, 2%, 5%, 8%, and 11%(w/v), was judged by using 9-point hedonic scale.

3. Monitoring changes during 2-week storage

The storage test of bael tea with aloe vera stored at ambience and at 4^{o}C was performed over two weeks including sensory evaluation and physicochemical analysis. The sensory evaluation and physicochemical analysis consisted of pH, total titratable acidity, total soluble solids, reducing sugar, and color measurement was carried out every 4 days for two weeks.

3.1 Sensory evaluation

The sensory evaluation of bael tea with aloe vera was carried out every 4 days during two-week storage test (day2, day6, day10, day14). The sensory evaluation was performed by 15 untrained panelists, asking for opinion on several attributes, such as color, aroma, flavor, sweetness, aftertaste, and overall liking. Two samples were served in each time of evaluation, which were bael tea with aloe vera stored in ambient temperature and bael tea with aloe vera stored under refrigeration. Both samples were chilled before serving. The results were statistically analyzed using SAS program with RCBD, factorial RCBD design and Duncan's multiple range test.

3.2 Physiochemical analysis of bael tea with aloe vera over 2-week storage

The physicochemical analysis of bael tea stored at ambient temperature and under refrigeration was carried out for two weeks as a storage test. The sampling was done every 4 days in triplicates. The pH values were determined with a digital pH meter using buffers of pH 4.0 and 7.0 for calibration. The total soluble solid was measured using portable refractometer and the values were expressed as ^{o}Brix. The acidity of bael tea was determined by titration of sample against 0.1N NaOH, according to AOAC (1995). The amount of reducing sugar in the sample was determined by dinitrosalicylic acid (DNS) assay in which a standard curve was constructed by using glucose solution at 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, and 0.1 mg/ml. The linear regression test was performed using Microsoft Excel 2016. The obtained equation was extrapolated to allow for determination of all subsequent calculations.

The color of bael tea was determined as L*, a*, and b* values using a HunterLab Miniscan EZ. The total color differences (ΔE) was calculated by using the following equation:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2}$$

The color differences (ΔL*, Δa*, Δb*) was obtained from the first day of storage subtracted by the last day of storage period (day1 - day13).

RESULTS AND DISCUSSION

1. Sensory evaluation on the suitable amount of bael and sweetness of the bael tea

Based on the statistical analysis, it was found that 3% of bael fruit in tea was preferred by panelists. It showed that 3% of bael fruit was significant different ($p<0.05$) in terms of color, aroma, flavor, sweetness, aftertaste and overall liking compared to other concentrations of bael tea. However, the hedonic score of sweetness was slightly low, range of 4 -5, since the amount of sugar was fixed at 2%. Thus, another sensory evaluation was performed to determine the sweetness level that meet consumers' liking. And it was found that the preferred sugar concentration on bael tea was 8%. The 8% sugar concentration was significantly different ($p<0.05$) compared to other treatments in all attributes. Therefore, from two sensory evaluation, it was found that 3% bael with 8% sugar was preferred in the bael tea composition (Table 1).

Table 1 Effect of bael concentration and sweetness level on the liking score

Effect	Level (% w/v)	Color	Aroma	Flavor	Sweetness	Aftertaste	Overall liking
Bael concentration	1.5	4.4±1.96^{c}	4.0±1.51^{c}	3.9±1.68^{c}	4.9±2.10^{b}	4.9±1.87^{b}	4.7±1.69^{c}
	2	5.9±1.57^{b}	5.8±1.10^{a,b}	5.6±1.43^{a,b}	5.9±1.83^{a}	5.0±1.52^{a}	5.7±1.45^{b}
	2.5	5.7±1.54^{b}	5.7±1.94^{b}	5.4±1.55^{b}	5.5±2.15^{a}	5.8±1.37^{a}	5.9±1.42^{a,b}
	3	7.1±1.05^{a}	6.5±1.36^{a}	6.2±1.64^{a}	5.6±1.69^{a}	5.8±1.35^{a}	6.4±1.19^{a}
	3.5	6.9±1.40^{a}	6.2±1.65^{a,b}	6.2±1.57^{a}	5.9±1.95^{a}	6.0±1.62^{a}	6.5±1.38^{a}
Sweetness	0	6.3±1.34^{a}	5.6±1.59^{b}	5.3±1.78^{c}	4.1±1.92^{c}	5.3±1.87^{b}	5.1±1.61^{c}
	2	6.8±1.54^{a}	5.9±1.73^{a,b}	6.2±1.91^{b}	5.5±1.91^{b}	5.7±1.86^{a,b}	5.9±1.48^{b}
	5	6.4±1.31^{a}	6.1±1.62^{a,b}	6.1±1.59^{b}	5.8±1.85^{a,b}	6.0±1.68^{a}	6.2±1.50^{a,b}
	8	6.8±1.07^{a}	6.4±1.45^{a}	7.0±1.17^{a}	6.5±1.64^{a}	6.2±1.56^{a}	6.7±1.11^{a}
	11	6.8±1.28^{a}	6.5±1.46^{a}	5.8±1.90^{b,c}	4.9±1.81^{b,c}	5.6±1.69^{a,b}	5.9±1.55^{b}

$^{a-c}$ Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p\leq0.05$).

2. Sensory evaluation during storage test

The sensory evaluation of bael tea with aloe vera after sterilization was carried out on 9-point hedonic score with color, aroma, flavor, sweetness, aftertaste, and overall liking as the quality

parameters. It was found out that bael tea with aloe vera stored at 4°C had higher overall liking score significantly different than the ones stored at ambient temperature at 95% confidential level (Table 2). All attributes except for the aftertaste received the liking scores that were not significantly different over two-week storage. However, the liking scores for aftertaste were better when kept at 4 °C ($p \leq 0.05$). Low temperature could have effect on the complexation of the bael strong aftertaste which, consequently, influenced the overall liking scores. In addition, the decline in overall liking scores during storage period was probably due to the loss of structure of aloe vera in the bael tea as given in the comment section of the questionnaire.

Table 2 Sensory evaluations of bael tea with aloe vera stored at ambient temperature and 4°C.

Sensory Attributes	Storage condition	Storage period (day)			
		Day 2	Day 6	Day 10	Day 14
Color	ambient	7.5 ± 0.99^{aA}	7.1 ± 1.28^{aA}	7.2 ± 1.15^{aA}	7.2 ± 1.42^{aA}
	4°C	7.2 ± 1.15^{aA}	7.1 ± 1.58^{aA}	7.3 ± 1.40^{aA}	7.3 ± 1.40^{aA}
Aroma	ambient	7.0 ± 1.25^{aA}	6.8 ± 1.57^{aA}	7.5 ± 1.30^{aA}	7.1 ± 1.92^{aA}
	4°C	7.3 ± 1.03^{aA}	7.0 ± 1.96^{aA}	7.1 ± 1.25^{aA}	7.2 ± 1.57^{aA}
Flavor	ambient	7.3 ± 1.18^{aA}	7.3 ± 1.23^{aA}	7.3 ± 1.16^{aA}	7.1 ± 1.67^{aA}
	4°C	7.3 ± 1.05^{aA}	7.7 ± 0.88^{aA}	7.4 ± 1.24^{aA}	7.1 ± 1.81^{aA}
Sweetness	ambient	6.8 ± 1.52^{aA}	7.8 ± 1.37^{aA}	7.4 ± 1.72^{aA}	6.9 ± 1.67^{aA}
	4°C	7.1 ± 1.46^{aA}	7.8 ± 1.08^{aA}	7.3 ± 1.76^{aA}	7.2 ± 1.57^{aA}
Aftertaste	ambient	6.0 ± 1.60^{bB}	6.8 ± 1.90^{aB}	6.4 ± 1.64^{aB}	6.5 ± 1.55^{abB}
	4°C	6.9 ± 1.53^{bA}	7.9 ± 1.28^{aA}	8.2 ± 1.15^{aA}	7.7 ± 1.22^{abA}
Overall liking	ambient	6.9 ± 1.16^{aB}	7.1 ± 1.19^{aB}	7.1 ± 0.83^{aB}	7.1 ± 1.30^{aB}
	4°C	7.7 ± 0.88^{aA}	8.0 ± 1.07^{aA}	8.3 ± 0.96^{aA}	7.7 ± 1.17^{aA}

[a-b] 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 ($p \leq 0.05$).

3. Physiochemical changes in bael tea with aloe vera over 2-week storage

The physicochemical analysis of bael tea with aloe vera was carried out during 2- week storage to observe the stability of bael tea with aloe vera. The 4x2x3 factorial RCBD was carried out and it was found that there was no significant different in triplicates ($p>0.05$). Therefore, the 4x2 factorial CRD was used as the experimental design for all attributes measured, except for the color measurement in which 4x3x2 factorial RCBD was used.

Table 3 Physiochemical changes in bael tea with aloe vera stored at ambient temperature and 4°C.

Parameters	Storage condition	Storage period (day)			
		Day 1	Day 5	Day 9	Day 13
pH	ambient	4.96±0.03^{cB}	4.93±0.02^{cB}	4.98±0.04^{bB}	5.04±0.01^{aB}
	4°C	4.85±0.02^{cA}	4.85±0.03^{cA}	4.97±0.03^{bA}	5.11±0.03^{aA}
Total acidity (%)	ambient	0.06±0.02^{bA}	0.1±0.02^{aA}	0.08±0.01^{abA}	0.05±0.01^{bA}
	4°C	0.07±0.01^{bA}	0.08±0.00^{aA}	0.07±0.01^{abA}	0.08±0.00^{bA}
Total soluble solid (°Brix)	ambient	11.00±0.00^{aA}	9.73±0.12^{cA}	10.00±0.00^{bA}	9.67±0.23^{bA}
	4°C	10.00±0.00^{aB}	8.87±0.12^{cB}	9.60±0.20^{bB}	9.60±0.20^{bB}
Reducing sugar (mg/ml)	ambient	7.37±2.43^{aA}	4.98±0.24^{bA}	5.52±1.09^{bA}	3.77±0.77^{bA}
	4°C	7.59±2.03^{aA}	5.03±0.88^{bA}	5.13±0.70^{bA}	3.84±1.10^{bA}

$^{a-b}$ 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 ($p \leq 0.05$).

Table 3 shows the physiochemical changes in bael tea with aloe vera stored at ambient temperature and 4°C over the two-week storage. The pH of bael tea with aloe vera increased towards the end of the storage test for both conditions. It might be caused by the decreasing in acidity of the bael tea with aloe vera. Bael fruit is a low-acid fruit (Chavasit *et al*., 2006), while aloe vera gel has pH of 4.6 (Sangma *et al*., 2016). Mgaya-Kilima *et al.* (2014) reported that the pH of roselle-fruit juice blend was increasing over time, which was from 2.34-4.37 (28°C) and 2.34-3.38 (4°C) during 6 months' storage test. On the other hand, the pH of blended bael with anola was decreasing over time, from 4.5-3.0 during 45 days' storage test (Rathod *et al*., 2014).

The slightly decreasing in acidity at ambient temperature might be due to the acidic hydrolysis of polysaccharides where acid is utilized for converting non-reducing sugar into reducing sugar (Bhardwaj & Pandey, 2011). The total soluble solids of bael tea with aloe vera was in the range of 8 – 11. The low amount of total soluble solid might be due to the use of dried bael slices, in which usually made from unripe bael fruit (Reddy, 2012). Unripe bael fruit has difference biochemical properties with ripe bael fruit. Ripe bael fruit has higher total soluble solid, which is 39.50% as reported by Charoensiddhi & Anprung (2008). The decreasing trend in total soluble solid was observed during the storage period. This finding was similar to the study on the bael and aloe vera blended beverage (Sunita & Ananya, 2015).

The reducing sugar was decreasing during the storage period. However, this result did not correspond to the other researches, in which the reducing sugar content would increase over time, as reported by Sangma *et al*. (2016) of ready-to-serve of blended aloe vera, sweet lime, amla, and ginger. The reducing sugar would increase over time due to the hydrolysis of starch component from aloe vera into simple sugar, and the formation of invert sugar from sucrose (Sangma *et al*., 2016).

Table 4 Color difference determination in bael tea with aloe vera stored at ambient temperature and 4°C.

	Ambient temperature	4°C
ΔL*	-14.86	-0.26
Δa*	12.26	2.04
Δb*	11.84	0.94
ΔE	8.35	2.23

Table 4 displays the difference in color measurement between day 1 and day 14. The L* parameter was analyzed using factorial CRD. From factorial CRD, it was found out that there was significant difference of storage period, storage condition, and interaction between storage period and storage condition ($p<0.05$). The lightness of bael tea with aloe vera decreased during storage period. Sterilization of samples might lead into the development of pale color, in which occurred in coconut water (Awua *et al.*, 2011). Also, the decrease in reducing sugar might influence the paler color of tea at the end of storage period. The bael tea with aloe vera stored in ambient temperature had darker color of tea. The changes in the lightness might be due to oxidation of the tea since the tea was packed in glass bottles, which was susceptible to light oxidation and Maillard reaction from phenol. The overall color changes in sample stored in ambient temperature was found very distinct ($\Delta E>3.0$), while the changes of sample in 4°C was distinct ($1.5< \Delta E<3.0$; Pathare *et al.*, 2012). From Table 4, the ambient sample had higher color differences than samples at 4°C, thus, the sample stored at 4°C was preferable in terms of color changes since color was the first attribute that people use during making the decision of either buying or consuming a product.

CONCLUSION

The bael tea with aloe vera formulation composed of 84% water, 8% sugar, 5% aloe vera, and 3% dried bael slices. The storage test was carried out for two weeks and several parameters, such as pH, total acidity, total soluble solids (TSS), reducing sugar, and color changes were measured, including the sensory evaluation. The pH, TSS, and color measurement were significant different ($p<0.05$) for both storage period and storage condition, range from 4.85 – 5.2, 9.6° - 11°Brix, (L* = 37.57, 40.63; a*=18.38, 13.93; b*= 50.66, 48.59) at the end of storage period. The total acidity and reducing sugar were significantly different on storage period ($p<0.05$). The sensory evaluation during storage test resulted in significant difference in aftertaste and overall liking score ($p<0.05$), in which most attributes scores were increasing during day2 to day10, and decreasing at day 14. From the sensory evaluation, the bael tea with aloe vera showed that it can be stored up to 10 days and

preferably stored under refrigeration. It is suggested that the shelf life determination should be conducted, along with the acceptance test and microbial test.

REFERENCES

AOAC. (1995). **Official Methods of Analysis of the AOAC International** (16th ed.). Washington, D.C.: Association of Official Analytical Chemists International.

Awua, A. K., Doe, E. D., & Agyare, R. (2011). Exploring the influence of sterilisation and storage on some physicochemical properties of coconut (*Cocos nucifera* L.) water. **BMC Research Notes**,4(1), 451. doi:10.1186/1756-0500-4-451

Bhardwaj, R. J., and S. Pandey (2011). Juice blends-a way of utilization of under-utilized fruits, vegetables, and spices: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition.** 51:563–570.

Charoensiddhi, S., & Anprung, P. (2008). Characterization of Bael Fruit (*Aegle Marmelos* [L.] Correa) Hydrolysate As Affected By Enzyme Treatment. **Journal of Food Biochemistry**,34(6), 1249-1267. doi:10.1111/j.1745-4514.2009Chavasit, V.,

Goodwin, L. (2016, April 06). **Herbal Tea and Infusion Definitions**. Retrieved May 29, 2017, from https://www.thespruce.com/herbal-tea-definition-765711

Mgaya-Kilima, B., Remberg, S. F., Chove, B. E., & Wicklund, T. (2014). Influence of storage temperature and time on the physicochemical and bioactive properties of roselle-fruit juice blends in plastic bottle. **Food Science & Nutrition**,2(2), 181-191. doi:10.1002/fsn3.97

Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. (2012). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. **Food and Bioprocess Technology**,6(1), 36-60. doi:10.1007/s11947-012-0867-9

Reddy, C. (2012, January 01). **All About Bael (*Aegle marmelos*)**. Retrieved July 23, 2017, from http://theindianvegan.blogspot.com/2012/10/all-about-bael.html

Sangma, D. C., Sarkar, S., & Mishra, L. K. (2016). Preparation and evaluation of ready-to-serve drink made from blend of Aloe vera, sweet lime, amla and ginger. **International Journal of Food and Fermentation Technology**,6(2), 457. doi:10.5958/2277-9396.2016.00072.6

Singh, A., Sharma H.K., Kaushal P., and Upadhyay A. (2014). Bael (*Aegle marmelos* Correa) products processing: A review. **African Journal of Food Science**,8(5), 204-215. doi:10.5897/ajfs2013.1119

Sunita, M., & Ananya, S. (2015). To Study the Physico-Chemical Properties of Bael and Aloe Vera Blended Beverages. **International Journal of Science and Research (IJSR)**,4(9), 642-645.

Zeratsky, K. (2015, April 11). **What are functional foods?** Retrieved June 05, 2017, from http://www.mayoclinic.org/healthy-lifestyle/nutrition-and-healthy-eating/expert-answers/functional-foods/faq-20057816

Effect of Strength Additive Modified Starches on Electrokinetic, Retention and Drainage of Linerboard Pulp Suspension

Sarochinee Wihakarat[1], Somwang Khantayanuwong[1] and Phichit Somboon[1*]

ABSTRACT

In the production of linerboard paper, the modified starches are typically used as a strength additives applied into a pulp furnish to improve the product strength. However, it was found that when the strength additive modified starches having different degrees of chemical substitutions were applied into the alum-based linerboard stock, they caused web breaking and lowers runnability of the machine. This phenomenon has an ambiguous understand of the application of strength additives starches under the variation of furnish charges in the alum-based stock. Therefore, this study was carried out to understand the eletrokinetic behaviors of industrial strength additive starches having various degrees of substitution performed in the alum-based linerboard stock, and to analyzed their retention and drainage efficiency of furnish components for indicating the machine runnability.

The experiments were consisted of two parts of studies. The first part of experiment was carried out to examine the electrokinetic behavior of strength additive modified starches having various degrees of substitution applied into the linerboard pulp suspension. The zeta potential of fiber surfaces and charges of pulp suspension were analyzed. The second part of experiment was to study the performance of the test modified starches applied into alum-based stock under different levels of aluminum ions. The electrokinetic potential and charges of pulp suspension related to the retention and dewatering of pulp components were analyzed.

The results were found that strength additive modified starches with various of degree of substitution applied into the alum-based linerboard pulp suspension to improve the mechanical properties of linerboard products could potentially changed the electrokinetic potential and charges of the suspension, and consequently produced the variation of their retention and dewatering efficiency. The degree of substitution, the amount of starch doses, and aluminum ions were found to be the important parameters affecting the runnability of the machine, which needed to be monitored and optimized during the production. These obtained results could be applied to optimize the wet-end chemistry in linerboard paper mills, and to appropriately select the strength additive modified starches applied into alum-based linerboard pulp suspension under various level of aluminum ions.

Key Words: modified starch, zeta potential, ionic demand, retention, drainage, degree of substitution, pulp suspension

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

[1]Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

In papermaking, wet-end modified starches are generally used as retention agents, drainage aids and strength additives. These modified starches are polymeric additives having various types including cationic, anionic and amphoteric starches, which have an influence on the electrokinetic of pulp suspension related to the retention and dewatering performances. An inappropriate application of these starches could potentially affect the runnability of paper and board machines and quality of products. Currently, there have various types of pulp suspension depended on the process technologies and the required products. Concerning the linerboard paper products, several paper mills are operated based on an alum-based pulp suspension. The alum is normally applied in various points at stock preparation process causing the various degrees of aluminum ions contained in the suspension. This could be strongly effect on the performances of other additive chemicals including the applied starches, and consequently influences on the product quality and runnability of the machines.

The alums or aluminum salts are generally used to enhance the performance of rosin size, adjust the pH, neutralize the excess anionic charge, and usually affect retention and drainage system (Hubbe, 2014). The alum salts are dissolved in pulp suspension and distributed into the aluminum ions, the aluminum hydroxide ions and the aluminum hydroxide molecules depended on the presented pH. These aluminum species have potentially an interaction with the modified starch molecules. Moreover, the linerboard stock consists of the recycled pulp having the fibers, fines, and other colloidal materials, which are negative charges. Therefore, the colloidal components, the aluminum ions and the applied starch molecules are interacted to each other. The variation of these colloidal charges are resulted in an unstable electrokinetic of pulp suspension, and thus affects the retention and dewatering efficiency during the paper web forming.

The electrokinetic of pulp suspension refers to the surface charges of stock components, which measured by using the streaming potential method used to elucidate interactions between polyelectrolyte species and the fiber surfaces called zeta potential (Hubbe *et al*., 2007). It was found that when zeta potential of pulp furnish closes to neutralization point, the furnish components are coagulated and consequently flocculated leading to produce the high retention and drainage performances (Norell*et al*., 1999). In alum based stock, the aluminum ions create the cationic patches on the pulp furnish particles causing their coagulation, which this mechanism involved the van der Waals attraction and electrostatic repulsion. While the retention modified starches are normally introduced to bridge the coagulated particles producing their flocculation (Hubbe, 2014; Maurer, 2001). Not only the retention modified starch could produce the flocculation of pulp furnish, but also

the other cationic strength additive starches could partially produce the flocculation and effect on the retention and dewatering performances (Liu *et al*., 2010).

In Thailand, the linerboard papers are mainly produced by using the local old corrugated container pulp “called local OCC pulp”, which obtains a lower strength of linerboard products. Thus in the productions, they are required the strength additives to enhance their mechanical properties. Normally, the modified starches produced from tapioca are used as a dry strength additives applied into a linerboard furnish. However, it was found that when the starch additives having different degree of chemical substitution were applied into the alum-based linerboard stock, they caused web breaking and lowers runnability of linerboard paper machine. This assumed that starch molecule, aluminum ions, and furnish components might be interacted, and thus caused the variation of the electrokinetic of their furnish resulting in the changes in the retention and dewatering mechanism. These changes produced the wet web having a variation of dryness and strength causing web breaking in between the forming and press sections. This phenomenon has an ambiguous understand of the application of starches under the variation of furnish charges in the alum based stock. Therefore, this study was carried out to understand the eletrokinetic behavior of industrial strength additive starches having various degrees of substitution performed in the alum-based linerboard stock, and to analyzed their retention and drainage efficiency of furnish components for indicating the machine runnability.

MATERIALS AND METHODS

1. Raw materials

A partially bleached hardwood pulp and a long fraction OCC pulp were obtained from Panjapol Paper Industry Co.,Ltd., linerboard paper mill, Thailand. The linerboard pulp was prepared by mixing the hardwood pulp of 70% and the long fraction OCC pulp of 30% according to the industry recipe. The mixed pulp was beaten by using a Valley beater to the freeness of 350 ml according to ISO 5261 part 1.Liquid alum with solid content of 50% was obtained from the linerboard mill. Strength additive modified tapioca starches were obtained from Siam modified starch co. Ltd., Thailand. The modified tapioca starches are having cationic substituent amino derivatives with the DS of 0.045, 0.065 and 0.095. The testing starches were cooked at the solid content of1% under temperature of 85°C and cooking time of 30 min. The cooked starches were kept in water batch under temperature of 60°C for mixing into the pulp furnish.

2.Methods

The experiments were consisted of two parts of studies. The first part of experiment was carried out to examine the electrokinetic behavior of strength additive modified starches having

various DS applied into the linerboard pulp suspension. The modified starches having the DS of 0.045, 0.065 and 0.095 were cooked and mixed into the linerboard pulp suspension at 0, 1 and 2 % of dry pulp according to industrial uses. The zeta potential of fiber surfaces and charges of pulp suspension were analyzed. The second part of experiment was to study the performance of the test modified starches applied into alum-based stock under different levels of alum ions. The alum were applied into the linerboard pulp suspension at 0, 1 and 2% of dry pulp based on the industrial application. After the alum-based stocks were prepared, the test starches having the DS of 0.045, 0.065 and 0.095 were applied into the stock. The electrokinetic potential and charges of pulp suspension including the retention and dewatering of pulp components were analyzed.

The electrokinetic potentials of fiber surfaces were measured by using the fiber potential analyzer (FPA). The analysis was based on the streaming potential measuring method. The obtained potentials were related to the zeta potential calculated from the streaming potential, the conductivity and the pressure difference according to the Helmholtz-Smoluchowski equation (Bhardwaj *et al*., 2005; Hubbe, 2006; Hubbe, 2014). The charges of colloidal were measured using the charge analyzing system (CAS). The analysis was based on the polyelectrolyte titration, which the filtrates of pulp suspension were titrated with standard cationic solution with 0.001 N of Poly-Dadmac or standard anionic solution with 0.001N of PVS-Na to a neutral streaming current endpoint. The obtained colloidal charges were reported based on the cationic or anionic demands of the pulp suspension filtrates (Hubbe, 2006; Hubbe, 2014).

The retention and drainageof pulp component on the wire was analyzed using the dynamic drainage jar (DDJ) installed with the wire screen having the size of 50 mesh. The analysis was carried out according to TAPPI standard (Bhardwaj *et al*., 2005; Khosravani *et al*., 2010). The linerboard pulp suspensions were prepared in the dynamic drainage jar generated turbulences with a constant agitation. The alum and starches were dosed into the test samples respectively with a given constant interval time at 1 min. After the test starches were applied, the test suspensions were drained through the drainage valve. The dewatering time was recorded and the retention of component on the wire were analyzed.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Electrokinetic behavior of strength additivemodified starches

The strength additive modified starches with various degree of substitution applied on the linerboard pulp suspension without other additive chemicals, which was found that the starches had an effect on the electrokinetic potential and colloidal charges of the pulp suspension. Their behaviors

performed in pulp suspension similar to the retention agents. Increasing the strength additive modified starches caused the zeta potential and colloidal charges approached to neutralization point as shown in Figure 1. The higher DS starch could effectively give the zeta potential and charges of pulp suspension reaching close to a neutral point, which is an optimum condition in papermaking process (Liu *et al*., 2010; Maurer, 2001).

In the simulation of industrial application, the strength additive modified starches were applied into an alum-based stock, which was found the performances of the starches were significantly affected by the degrees of the aluminum ions contained in the stock. Increasing aluminum ions produced the positive charges in the pulp suspension obtained a lower amount of starch doses to reach the neutralization point of the alum-based linerboard stock as shown in Figure 2. However, the high amount of alum and starch doses could give an over neutral point, especially the utilization of a high DS starch. Concerning the electrokinetic behavior, it was found that the amount of starch doses, the degree of substitution and the degree of an aluminum ions were interacted. These parameters were interacted and consequently produced unstability of wet-end chemistry in the process. Finally, this effected the dewatering and retention efficiencies of pulp components on the linerboard machine.

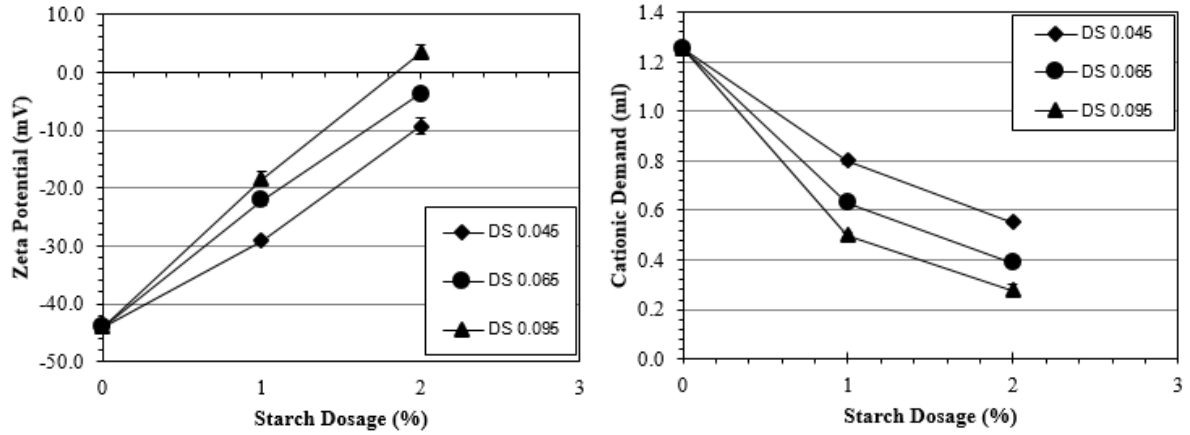


Figure 1 Zeta potentials and charges of pulp suspension under the various doses of strength additive modified starches with different degree of substitution.

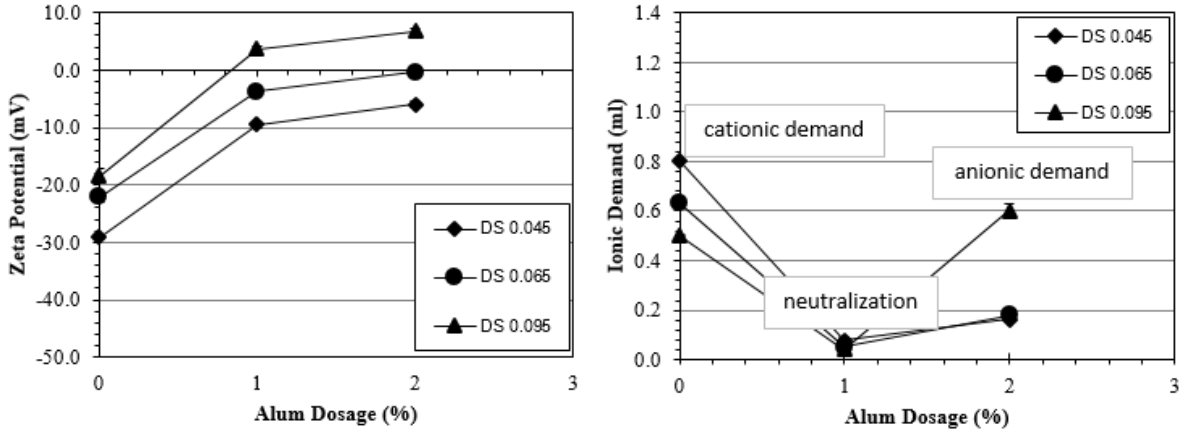


Figure 2 Zeta potentials and charges of pulp suspension under the various levels of aluminum ions at a given dose of modified starches with different degree of substitution.

2. Retention and dewatering of alum-based stock components

The utilization of strength additive modified starches could significantly effect on the retention of alum-based pulp components. Increasing amount of starches doses and degree of aluminum ions gave a lower retention of pulp component as shown in Figure 3. The retention efficiency of pulp components was significantly effected by their electrokinetic potentials as shown in Figure 5. However, the starch with a higher DS of 0.095 had a lower influence on the pulp retention. The examination of fiber surface potential was found that increasing amount of starch and alum doses could significant effect the neutralization point, and thus lower the retention efficiency as show in Figure 2.

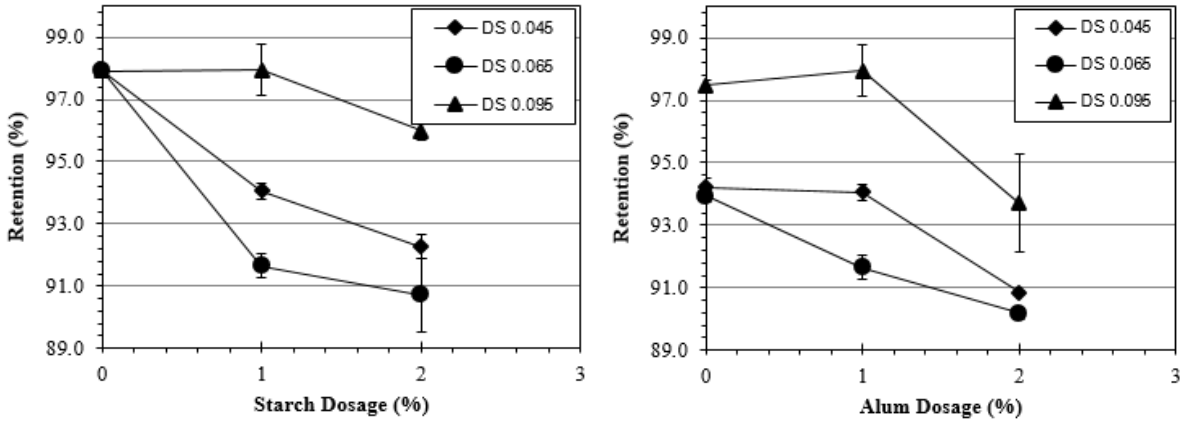


Figure 3 Retention of pulp suspension under the application of various amount of strength additive modified starches with different DS and various degrees of aluminum ions.

The examination of dewatering efficiency was found that increasing the amount of starch and degree of aluminum ions produces a lower dewatering time, improved the dewatering

efficiency (Figure 4). This phenomenon could increase the dryness of wet sheets, and thus improve the linerboard machine runnability. The modified starch having a higher DS of 0.095 obtained a good dewatering from alum-based pulp component. However, the high level of aluminum ions contained in the pulp suspension was found less influence on the dewatering. The optimum point of dewatering could be in a range of zeta potential close to neutral point with slightly negative as shown in Figure 2.

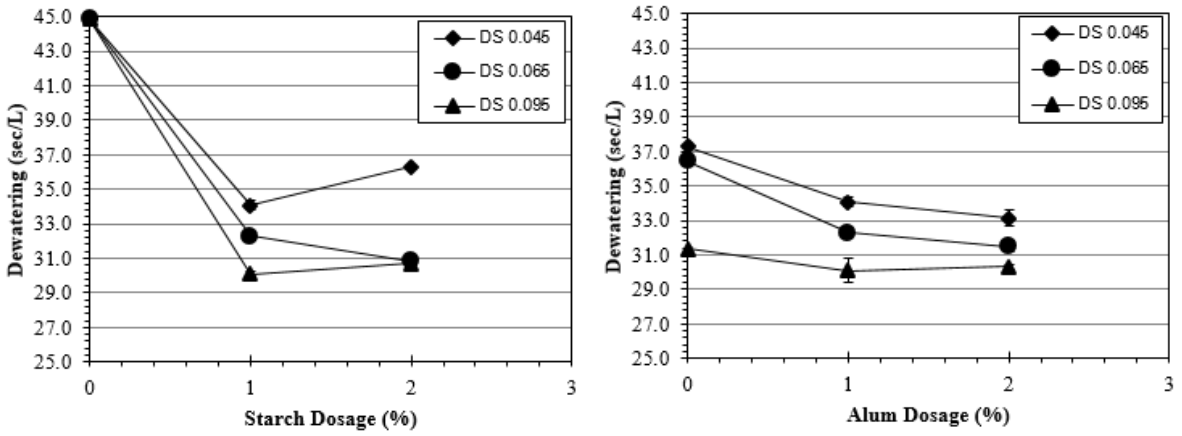


Figure 4 Dewatering of pulp suspension under the application of various amount of strength additive modified starches with different DS and various degrees of aluminum ions.

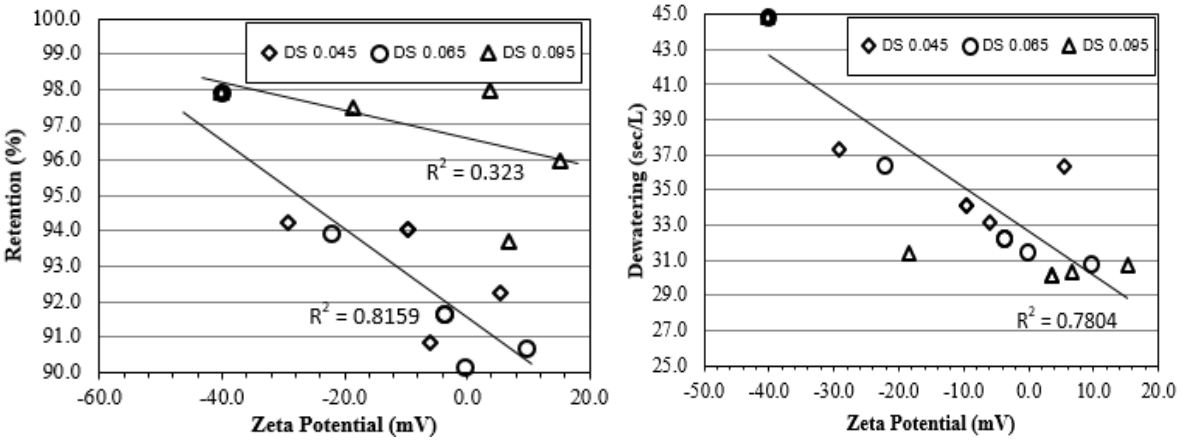


Figure 5 Effect of zeta potential of pulp suspension on the retention and dewatering under the variation of starch and alum doses.

CONCLUSION

Strength additive modified starches with various of degree of substitution applied into the alum-based linerboard pulp suspension to improve the mechanical properties of linerboard products could potentially changed the electrokinetic potential and charges of the suspension, and

consequently produced the variation of their retention and dewatering efficiency. The degree of substitution, the amount of starch doses, and aluminum ions were found to be the important parameters affecting the runnability of the machine, which needed to be monitored and optimized during the production. These obtained results could be applied to optimize the wet-end chemistry in linerboard paper mills, and to appropriately select the strength additive modified starches applied into alum-based linerboard pulp suspension under various level of aluminum ions.

ACKNOWLEDGMENT

This research was completed in the Laboratory of Pulp and Paper Technology, Kasetsart University. Raw materials were supported from Panjapol Paper Industry Co.,Ltd. and Siam Modified Starch Co., Ltd.

REFERENCES

Bhardwaj, N.K., S. Kumar and P.K. Bajpai. 2005. Effect of zeta potential on retention and drainage of secondary fibres. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**. 260: 245–250.

Hubbe, M.A. 2006. Sensing the Electrokinetic Potential of Cellulosic Fiber Surfaces. **Bioresources**. 1(1): 116-149.

Hubbe, M.A. 2014. A Review of Ways to Adjust Papermaking Wet-End Chemistry: Manipulation of Cellulosic Colloidal Behavior. **Lignocellulose**. 3(1): 69-107.

Hubbe, M.A., O.J. Rojas, D.S. Argyropoulos, Y. Wang, J. Song, N. Sulic and T. Sezaki. 2007. Charge and the dry-strength performance of polyampholytes Part 2. Colloidal effects. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**. 301: 23-32.

Khosravani, A., A.J. Latibari, S.A. Mirshokraei, M. Rahmaninia and M.M. Nazhad. 2010. Studying The Effect of Cationic Starch-Anionic Nanosilica on Retention and Drainage. **BioResources**. 5(2): 939-950.

Liu, Q., J. Li and W. Xu. 2010. Application of Cationic Starch with High Degree of Substitution in Packaging Paper from High Yield Pulp. *In* **Proceedings of the 17th IAPRI World Conference on Packaging**. pp 35-38.

Maurer, H.W. 2001. Adsorption of Starch on Papermaking Furnish. *In*"**Starch and Starch Products for Wet End Application**". H.W. Maurer (ed.): 76-82. Tappi Press. Norcross, GA.

สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกของกระชายเหลืองด้วยเอนไซม์เพกติเนส

Optimal Condition for Phenolic Extraction from Fingerroot *(Boesenbergia pandurata)* Using Pectinase Enzyme

ชัญญา บางโชคดี[1*] สุคันธรส ธาดากิตติสาร[2] และ หทัยรัตน์ ริมคีรี[1]

Chanya Bangchokdee[1*], Sukuntaros Tadakittisarn[2] and Hatairat Rimkeeree[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดฟีนอลิกจากกระชายเหลืองด้วยเอนไซม์เพกติเนส โดยใช้วิธีประเมินพื้นผิวตอบสนอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดกระชายเหลืองปริมาณ 4 g ด้วย เอทานอลที่ความเข้มข้น 40 % (w/v) ปริมาตร 300 mL ความเข้มข้นเอนไซม์เพกติเนส 1% (w/v) ปริมาตร 40 µL เป็นเวลา 85 min ได้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 13.24 mg GAE/g DW มีค่าการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH = 4.40 mg Trolox/g และ FRAP = 23.54 µmol Fe^{2+}/g) สารสกัดแห้งของผงกระชาย ประกอบด้วย cardamonin 1.62 µg/mg pinocembrin 21.05 µg/mg pinostrobin 58.16 µg/mg 4-hydroxypanduratin A 0.55 µg /mg และ panduratin A 15.61 µg /mg ภายใต้สภาวะเหล่านี้สามารถสกัดสารประกอบฟีนอลิกได้ 13.24 mg GAE/g DW ซึ่งได้ใกล้เคียงกับค่าทำนายคือ 13.94 mg GAE/g DW โมเดลนี้ได้รับการตรวจสอบภายใต้สภาวะเหมาะสมเหล่านี้

ABSTRACT

The aim of this research was to find optimal condition for phenolic extraction from fingerroot using enzyme by Response Surface Methodology. The optimal condition of extraction was 300 mL of 40% (w/v) ethanol 40 µL of 1% (w/v) pectinase enzyme for 85 minutes. This condition gave amount of phenolic content 13.24 mg GAE/g DW and showed antioxidant activities (DPPH=4.40 mg Trolox/g and FRAP=23.54 µmol Fe^{2+} / g). HPLC showed that fingerroot extract had cardamonin 1.62 µg/mg pinocembrin 21.05 µg/mg pinostrobin 58.16 µg/mg 4-hydroxypanduratin A 0.55 µg /mg and panduratin A 15.61 µg /mg. Under these conditions, 13.24 mg GAE/g of total phenolic compounds were extracted which was very close to the predicted value of 13.94 mg GAE/g. The model was validated at these optimal points.

Key Words: fingerroot, phenolic compound, antioxidant, response surface methodology (RSM), optimization

[*]Corresponding author; e-mail address: thatssochanya@gmail.com

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, 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

กระชายเหลืองจัดเป็นพืชในวงศ์ *Zingiberaceae* มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Boesenbergia pandurata* (วิทย์, 2539) เป็นพืชล้มลุกมีลำต้นใต้ดินเรียกว่าเหง้า (rhizome) เนื้อในเหง้าและรากมีสีเหลืองมีกลิ่นเฉพาะตัวที่เป็นเอกลักษณ์จัดเป็นพืชสมุนไพรที่มีคุณประโยชน์ทางยามีคุณค่าทางอาหารในประเทศไทยมีการเพาะปลูกกระชายเหลืองกันอย่างแพร่หลายและยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศให้ผลผลิตปริมาณมากในการเก็บเกี่ยวผลผลิตแต่ละครั้ง มีราคาไม่แพง ปัจจุบันจึงเริ่มมีความนิยมในการนำกระชายเหลืองมาเป็นส่วนประกอบของอาหารทำเป็นเครื่องดื่มและยารักษาโรคเนื่องจากเป็นสมุนไพรที่มีรสเผ็ดร้อนขมมีกลิ่นหอมรวมถึงยังมีสรรพคุณทางยาอีกมากมายอาทิเช่น แก้ท้องอืดท้องเฟ้อ อาการจุกเสียดแน่นท้อง โรคกระเพาะ ช่วยขับลม (กระทรวงสาธารณสุข, 2541) อีกทั้งในกระชายยังมีสมบัติที่สำคัญเช่น ความสามารถการต้านออกซิเดชั่น ความสามารถในการยับยั้งการก่อกลายพันธุ์ และความสามารถในการต้านไวรัส จุลินทรีย์ เชื้อรา นอกจากนี้สารประกอบหลักที่สำคัญที่พบในกระชายเหลืองส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ (กวิน, 2554)

กระชายเหลืองมีสารประเภทฟลาโวนอยด์และอนุพันธ์เช่นกลุ่มฟลาวาโนน ได้แก่ alpinetin pinostrobin pinocembin และกลุ่มฟลาโวน ได้แก่ dimethoxyflavone 3,4,5,7-tetramethoxyflavone เป็นต้น (Mongkolsuk and Dean,1964) และมีสารสำคัญ 6 ชนิดในกระชายสด คือ pinocembrin chalcone cardamonin pinostrobin, 4-hydroxypanduratin A และ panduratin A รวมทั้งทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเกิดสารก่อกลายพันธุ์พบว่าสารกลุ่มฟลาโวนอยด์นี้สามารถยับยั้งการเกิดสารก่อกลายพันธุ์ได้ดี (Trakoontivakorn *et al*., 2001)

การสกัดด้วยเอนไซม์ (Enzyme extraction) มีรายงานการใช้เอนไซม์ในการสกัดสารหลายชนิด เพื่อย่อยผนังเซลล์พืชจะช่วยให้การสกัดสารประกอบฟีนอลิกได้ดีขึ้น Li *et al*. (2005) โดยจะทำลายโครงสร้างทำให้องค์ประกอบภายในถูกปลดปล่อยออกมา เอนไซม์เซลลูเลส เป็นกลุ่มของเอนไซม์ ย่อยเซลลูโลสได้กลูโคส บีต้ากลูโคซิเดส ย่อยพันธะอัลฟา 1-4 ในเซลลูโลส ทำให้โพลีฟีนอลถูกปลดปล่อยออกมา การใช้เอนไซม์ในกระบวนการสกัดสารนั้น ต้องควบคุมมีสภาวะต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อัตราส่วนระหว่างของแข็งและของเหลว ระยะเวลา ที่อุณหภูมิ และพีเอชต่างๆ เพื่อให้ได้สภาวะในการสกัดที่เหมาะสมที่สุด

กระชายเหลืองเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ที่ช่วยต้านออกซิเดชั่น สามารถยับยั้งการเกิดสารก่อกลายพันธุ์ มีความสามารถในการต้านไวรัส จุลินทรีย์ เชื้อรา งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากกระชายเหลืองร่วมกับเอนไซม์ โดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) ในการวิเคราะห์หา ปริมาตรตัวทำละลาย เวลา และความเข้มข้นของเอนไซม์ ในการสกัดที่เหมาะสมที่สุดเพื่อสร้างโมเดล และทดสอบข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยเน้นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สารสกัดที่ได้จะมีการปนเปื้อนน้อยที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

กระชายเหลืองสดจากอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม อายุ 8 เดือน ซึ่งปลูกในวันที่ 27 พฤษภาคม 2557 และเก็บเกี่ยวผลผลิตในวันที่ 18 มกราคม 2558

การเตรียมตัวอย่าง

นำกระชายเหลืองสดมาอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง บดและร่อนคัดขนาดให้ได้อนุภาค 40-60 mesh

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากกระชายเหลือง

การสกัดสารประกอบฟีนอลิกโดยใช้วิธีที่ดัดแปลงจาก ธนศักดิ์และคณะ (2551) ตามภาพที่ 1 จากนั้นใช้วิธีการประเมินพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากกระชายเหลืองโดยการวางแผนการทดลองแบบ Central composite design (CCD) ศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของเอนไซม์ (%) เวลา (min) และปริมาตรตัวทำละลาย (mL) ที่ใช้ในการสกัด กำหนดให้แต่ละปัจจัยใน CCD มี 5 ระดับ คือ $-\alpha$ -1 0 +1 และ $+\alpha$ มีทั้งหมด 20 การทดลอง และการทดลองที่จุดตรงกลาง 6 ซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 1

ผงกระชาย 3 g เติมเอทานอลที่ความเข้มข้น 40 % (w/v) ปริมาตร 100 mL และ ความเข้มข้นเอนไซม์เพกติเนส 1% (w/v) ปริมาตร 30 µL

↓

เขย่าด้วยเครื่อง shaking water bath ที่ความเร็ว 150 rpm ณ อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 120 min

↓

กรองด้วยระบบสุญญากาศ

↓

เก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ -20°C และนำไปวิเคราะห์ต่อไป

↓

ระเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ

Figure 1 The process of fingerroot solvent extraction

Table 1 Factors and levels of phenolic extraction using central composite design (CCD)

Factors	Variables	Levels				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Solvent (mL)	X_1	32	100	200	300	368
Time (min)	X_2	0	49	120	191	240
Enzyme (%)	X_3	0	0.6	1.0	1.6	2.0

การวิเคราะห์สารสำคัญและฤทธิ์ทางชีวภาพ

- วิเคราะห์และวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลิก โดยวิธีของ Lim *et al*. (2007) เติมตัวอย่างสารสกัดใส่ในหลอดทดลองปริมาตร 300 ไมโครลิตรใส่สารละลาย Folin – Ciocalteuเจือจาง 10 เท่า 1.5 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 7.5% (w/v) 1.2 มิลลิลิตรนำไปผสมด้วยเครื่องผสมสารละลาย 10 วินาทีจากนั้นเก็บไว้ในที่มืด 30 นาทีนำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตรและนำค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิก

- วิเคราะห์และวัดปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ โดยวิธีของ Wolfe *et* al. (2003) โดยนำสารสกัดจากกระชายเหลือง 300 ไมโครลิตร เติมลงในหลอดทดลองที่มีน้ำกลั่นอยู่ 1200 ไมโครลิตรใส่โซเดียมไนไตร์ทร้อยละ 5 ปริมาตร 90 ไมโครลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลานาน 5 นาที จากนั้นเติมอลูมิเนียมคลอไรด์ร้อยละ 10 ปริมาตร 90 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ 6 นาที เติม โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 600 ไมโครลิตรและเติมน้ำกลั่นปริมาตร 720 ไมโครลิตรจากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตรนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเคทเทคินโดยคำนวณค่าเป็นมิลลิกรัมเคทเทคินต่อ 100 กรัมสารสกัด
- การวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยการตรวจสอบคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ 2, 2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH Radical Scavenging Capacity Assay) ทำการทดสอบโดยเตรียมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 1 มิลลิโมล ในเอทานอล และปรับให้มีค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) เท่ากับ 0.650+0.020 ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเอทานอล นำสารทดสอบที่ละลายในเมทานอลปริมาตร 50 ไมโครลิตร ผสมสารละลาย DPPH 2.95 มิลลิลิตร ผสมสารให้เข้ากันและทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร และการทดสอบการต้านออกซิเดชัน Ferric reducing/antioxidant power (FRAP) assay โดยดัดแปลงวิธีของ Floegel *et al.* (2011) ทำการเจือจางสารทดสอบด้วยเมทานอล นำสารทดสอบจำนวน 60 ไมโครลิตรใส่ลงในหลอดทดสอบ เติมน้ำจำนวน 180 ไมโครลิตร สาร FRAP reagent จำนวน 1.8 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง ทิ้งไว้อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร
- การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารสกัดกระชายด้วย HPLC คอลัมน์ที่ใช้คือ TSK gel super ODS ขนาด 5.0x100 มิลลิเมตร อนุภาค 2 ไมโครเมตร ปรับอุณหภูมิคอลัมน์เท่ากับ 40 องศาเซลเซียสขณะวิเคราะห์ เฟสเคลื่อนที่ได้แก่ A: 0.5% formic acid และ B: Acetonitrile โดยตัวอย่างจะผ่านการวิเคราะห์โดยใช้ diode array detector ตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่น UV ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 200-600 นาโนเมตร ในการแสดงผลการวิจัย จะเน้นผลการทดลองจากการตรวจวัดด้วยความยาวคลื่น 280 และ 340 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นค่าความยาวคลื่นที่ตรงกับค่า λ_{max} โดยรวมของสารต่างๆ ที่สนใจมากที่สุดการวิเคราะห์สารสกัดแต่ละตัวอย่างจะใช้ปริมาณเท่ากัน คือ 0.010 มิลลิกรัม (ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร)

  และ การหาปริมาณของสารที่สนใจ จะใช้วิธีการทาง Quantitative HPLC ซึ่งทำโดยการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้พีคของสารต่างๆ ในโครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างสารสกัด เทียบกับกราฟมาตรฐาน (standard curve) ของพื้นที่ใต้พีคต่อปริมาณของสารมาตรฐาน (standard chemical) ชนิดนั้นๆ โดยกราฟมาตรฐานจะทำขึ้นโดยหาพื้นที่ใต้พีคที่ช่วงความเข้มข้นต่างๆ ของสารที่สนใจ โดยนำสารมาตรฐานมาวิเคราะห์ด้วย HPLC แยกต่างหากทีละสาร และนำค่าพื้นที่ใต้พีคนั้นๆ มาพลอตเป็นกราฟ

เส้นตรงคำนวณหาความชันของกราฟและจุดตัดแกน X เพื่อหาสมการมาตรฐานที่จะนำไปใช้คำนวณปริมาณสารที่สนใจแต่ละสารในตัวอย่างสารสกัด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดกระชายเหลืองโดยใช้การประเมินพื้นผิวตอบสนอง (RSM)

วิธีการประเมินพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากกระชายเหลืองโดยการวางแผนการทดลองแบบ Central composite design (CCD) ศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของเอนไซม์ (%) เวลา (min) และปริมาตรตัวทำละลาย (mL) ที่ใช้ในการสกัด กำหนดให้แต่ละปัจจัยใน CCD มี 5 ระดับ คือ $-\alpha$ -1 0 +1 และ $+\alpha$ มีทั้งหมด 20 การทดลอง และการทดลองที่จุดตรงกลาง 6 ซ้ำ พบว่าให้ค่าฟีนอลิกตั้งแต่ 2.87 ถึง 14.58 mg GAE/g ผงกระชาย ดังแสดงในตารางที่ 2

Table 2 CCD and the response values for phenolic content and antioxidant activity of fingerroot extraction

Run	Factor			TPC (mg GAE/g DW)	DPPH (mgTrolox/g)	FRAP (μmol Fe^{2+})/g
	Volume (ml): x_1	Time (min): x_2	Enzyme (%): x_3			
1	-1 (100)	-1 (49)	-1 (0.6)	6.07	1.39	12.05
2	-1 (100)	1 (191)	-1 (0.6)	6.51	1.41	11.45
3	1 (300)	-1 (49)	-1 (0.6)	12.57	3.18	20.99
4	1 (300)	1 (191)	-1 (0.6)	11.09	3.19	18.17
5	-1 (100)	-1 (49)	1 (1.4)	5.43	1.38	12.10
6	-1 (100)	1 (191)	1 (1.4)	6.33	1.27	11.12
7	1 (300)	-1 (49)	1 (1.4)	12.14	3.11	22.44
8	1 (300)	1 (191)	1 (1.4)	14.58	2.72	20.70
9	0 (200)	-1.682(0)	0 (1.0)	11.58	2.72	15.91
10	0 (200)	1.682(240)	0 (1.0)	9.58	2.38	16.04
11	-1.682(32)	0 (120)	0 (1.0)	2.87	0.58	11.73
12	1.682(368)	0 (120)	0 (1.0)	15.04	4.40	23.54
13	0 (200)	0 (120)	-1.682(0)	9.94	2.95	16.25
14	0 (200)	0 (120)	1.682(2.0)	11.16	2.84	16.08
15	0 (200)	0 (120)	0 (1.0)	12.66	1.92	15.11
16	0 (200)	0 (120)	0 (1.0)	11.51	3.42	19.33
17	0 (200)	0 (120)	0 (1.0)	12.66	3.13	16.52
18	0 (200)	0 (120)	0 (1.0)	11.84	2.70	15.26
19	0 (200)	0 (120)	0 (1.0)	11.82	2.73	15.58
20	0 (200)	0 (120)	0 (1.0)	13.83	3.04	15.67

Table 3 The mathematical model and a coefficient showing the relationship between the independent variables and total phenolic content

Variable	Models	R^2	Model significant	Lack of fit significant
Total phenolic	$1213.18 + 336.12^* X_1 - 0.99 * X_2 - 12.59^* X_3 - 45.06 * X_1{}^* X_2 + 36.47^* X_1{}^* X_3 - 90.01^* X_2{}^* X_3 - 75.98 * X_1^2 - 19.82 * X_2^2 + 23.27 * X_3^2$	0.9513	33.51	ns

Note: ns = not significant

จากสมการของปริมาณฟีนอลิก นำมาสร้างเป็นแผนภาพ Contour และ ภาพ 3 มิติ พบว่า เมื่อพิจารณาแผนภาพแบบ Contour และภาพ 3 มิติของปริมาณฟีนอลิก พบว่า ในช่วงเวลา 100–170 min และความเข้มข้นเอนไซม์ที่ 0.75 – 1.75% จะให้ปริมาณฟีนอลิกสูงโดยมีค่าเท่ากับ 11.54 – 12.11 mg GAL/ g ผงกระชาย ดังภาพที่ 2

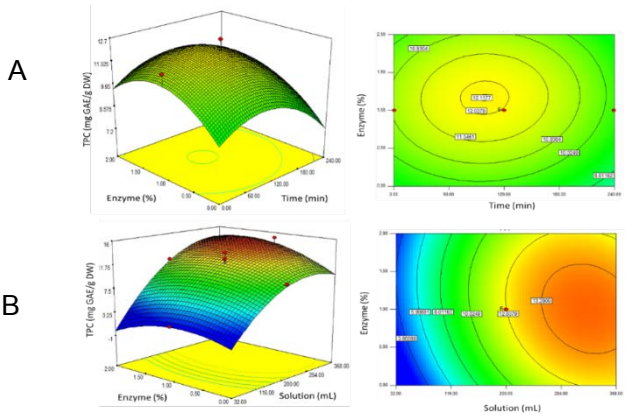


Figure 2 Response 3D and contour plot corresponding to total phenolic content from the extraction as a function of enzyme and extraction time at 200 mL of solvent. (A) Response 3D and contour plot corresponding to total phenolic content from the extraction as a function of enzyme and solvent at 120 min extraction time (B)

เมื่อนำแผนภาพมาซ้อนทับกัน (ภาพที่ 3) โดยกำหนดให้ปริมาณฟีนอลิกมีค่าสูง แต่ใช้เอนไซม์และเวลาในการสกัดต่ำ เป็นการประหยัดพลังงาน ต้นทุน และเวลา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้เวลาในการสกัด 85 min โดยใช้เอทานอลความเข้มข้น 40% ที่ปริมาตร 300 mL และความเข้มข้นเอนไซม์ 1.0% (w/v) จากสภาวะดังกล่าวสามารถสกัดสารประกอบฟีนอลิกได้ 13.24 mg GAE/g DW ซึ่งได้ใกล้เคียงกับค่าทำนายคือ 14.36 mg GAE/g DW เมื่อใช้ผงกระชาย 4 g และความเข้มข้นเอนไซม์ 1% (w/v) เวลาสกัด 85 min ดังตารางที่ 4 การสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากกระชายเหลืองเอทานอลความเข้มข้น 40% ร่วมกับเอนไซม์เพกติเนสนั้นสามารถช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิกได้สูงกว่าการใช้ตัวทำละลายอะซีโตน คือ 194.66 mg GAE/100 g fresh weight ซึ่งสูงกว่าเอทานอลที่ความเข้มข้น 80% เมทานอลที่ความเข้มข้น 80% และน้ำ (ธนศักดิ์, 2551) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายหลัก จึงนับว่าเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สารสกัดที่ได้จะมีการปนเปื้อนน้อยที่สุด

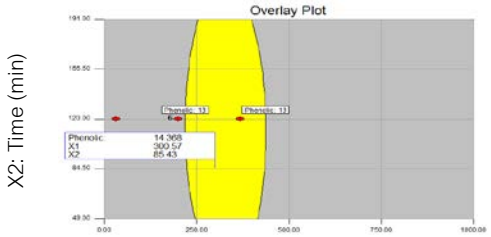


Figure 3 The superimposed contour plot showing the combined effect of 1% enzyme and the volume of 40% ethanol 300 mL and 85 min of extraction time on 14.36 mg GAE/g DW of total phenolic content of fingerroot

Table 4 The comparison of total phenolic content between prediction and experimental

Time (min)	Volume (mL)	Enzyme (%)	TPC (mg GAE/g DW)	
			Prediction	Experimental
85	300	1	14.368	13.24

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารสำคัญในสารสกัดกระชายเหลือง

จากการวางแผนการทดลองแบบ CCD เมื่อได้ค่าวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกด้วยเอนไซม์เพกติเนส จะเห็นว่า สิ่งทดลองที่ 8 12 และ 20 จะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์สูง เท่ากับ 14.58 15.04 และ13.83 mgGAE/g ผงกระชาย ตามลำดับ DPPH 1.35 4.4 และ 3.04 mgTrolox/g ตามลำดับ และ FRAP เท่ากับ 10.8 23.54 และ 15.67 μmol(Fe^{2+})/g ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบสารสกัดด้วย HPLC พบว่าสิ่งทดลองที่ 8 12 และ 20 ประกอบด้วยสารเหล่านี้ ดังตารางที่ 5 ในการหาสภาวะที่เหมาะสม พบว่า ปริมาตรเอทานอลความเข้มข้น 40% เป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณฟีนอลิกมากที่สุด เมื่อใช้เวลาในการสกัดน้อย ใช้ปริมาตรตัวทำละลายน้อย และใช้เอนไซม์ความเข้มข้นต่ำ แต่สามารถสกัดให้สารประกอบฟีนอลิกได้มาก ประหยัดพลังงาน ต้นทุน และเวลา ได้สภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้เวลาในการสกัด 85 min โดยมีเอทานอลความเข้มข้น 40%(w/v) ปริมาตร 300 mL และความเข้มข้นเอนไซม์ 1.0% (w/v)

Table 5 Total flavonoid content 1-6 from fingerroot extracted

Sample	Active ingredient (μg/mg)					
	1*	2	3	4	5	6**
F8	-	2.19±0.36^{a}	23.39±2.18^{a}	76.25±5.11^{a}	0.99±0.67^{a}	19.75±1.66^{a}
F12	-	2.15±0.27^{a}	22.74±1.52^{a}	72.07±3.42^{ab}	0.99±0.25^{a}	20.79±2.94^{a}
F20	-	1.78±0.36^{ab}	21.63±1.92^{ab}	62.99±2.78^{c}	0.40±0.25^{ab}	17.16±1.58^{ab}

Note : * 1 = pinocembrin chalcone, 2 = cardamonin,3 = pinocembrin, 4 = pinostrobin, 5 = 4-hydroxypanduratin A,6 = panduratin A

** Not define (the area below Y intercept from standard curve)

a-c mean within a roll with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$), A-B mean within a column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$), The extract were diluted 1000 times.

สรุป

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากกระชายเหลืองด้วยเอนไซม์เพกติเนส พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้เวลาในการสกัด 85 min โดยมีปริมาตรเอทานอลความเข้มข้น 40% ปริมาตร 300

mL และความเข้มข้นเอนไซม์เพกติเนส 1.0% ต่อผงกระชาย 4 g จากสภาวะดังกล่าวสามารถสกัดสารประกอบฟีนอลิกได้ 13.24 mg GAE/g ผงกระชาย ซึ่งได้ใกล้เคียงกับค่าทำนายคือ 13.94 mg GAE/g DW ผลวิเคราะห์ปริมาณ สารฟลาโวนอยด์ด้วย HPLC พบว่า ประกอบด้วยcardamonin pinocembrin pinostrobin 4-hydroxypanduratin A และpanduratin A 1.62 21.05 58.16 0.55 และ 15.61 µg /mg ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (สวก.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความกรุณาใช้สถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงสาธารณสุข. 2541. **ยาสมุนไพรสำหรับสาธารณสุขมูลฐาน**. กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์องค์การทหารผ่านศึก.

กวิน สุขสิงห์. 2554. **ผลของการทำแห้งต่อสารกลุ่มฟลาโวนอยด์และความสามารถต้านออกซิเดชั่นของสารสกัดกระชายเหลือง (*Boesenbergia rotunda*)**. ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนศักดิ์ แซ่เลี่ยว, ศศิธร จันทนวรางกูร., วรรณี จิรภาคย์กุล. 2551. **ผลของตัวทำละลายต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถต้านออกซิเดชันของกระชายเหลือง (*Boesenbergia pandurata*)**. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Floegel, A., D. Kim, S. Chung, S.I. Koo and O.K. Chun. 2011. Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. **J. Food Compos. Anal** 24:1043–1048.

Lim, Y.Y., T.T. Lim and J.J. Tee. 2007. Antioxidant properties of several tropical fruits: a comparative study. **Food Chemistry** 103: 1003-8.

Mongkolsuk, S and F.M. Dean. 1964. Pinostrobin and alpinetin from *Kaempferia pandurata*. **J. Chem. Soc**.46: 54–55.

Trakoontiwakorn, G., N. Kazuhiko, S. Hiroshi, T. Makiko, O.K. Mayumi, O. Hiroshi, Y. Mitsuru, N. Tadahiro and T. Tojiro. 2001. Structural analysis of a novel antimutagenic compound, 4 hydroxypanduratin a, and the antimutagenic activity of flavonoids in a Thai spice, Fingerroot (*Boesenbergia pandurate* Schult.) against mutagenic heterocyclic amines. **J. Agric. Food Chem**. 49: 3046-3050.

Wolfe, K., X. Wu and R.H. Liu. 2003. Antioxidant activity of apple peels. **J Agric Food Chem**. 51: 609-14.

Li, B.B., B. Smith and M.M. Hossain. 2005. Extraction of phenolics from citrus peels: II. Enzyme-assisted extraction method. **Sep Purif Technol**. 48:189–196.

สมบัติและฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งของสารสกัดโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105

Characterization and Anti-Cancer Cells Activities of Albumin Protein Extract from Khao Dawk Mali 105 Rice Bran

ธัญลักษณ์ สีลาจันทร์[1*] สุคันธรส ธาดากิตติสาร[2] และ หทัยรัตน์ ริมคีรี[1]

Thanyaluk Seelachan[1*], SukuntarosTadakitisarn[2] and Hathairat Rimkeeree[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมบัติ และฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งของสารสกัดโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อินทรีย์ หีบเย็นสกัดน้ำมัน พบว่าสารสกัดที่ได้มีโปรตีนร้อยละ 16.62 มีสารประกอบฟีนอลิก ร้อยละ 1.69 กรัม GAE แร่ธาตุที่พบได้สูงสุดคือ โปแตสเซียม (4.75 กรัมต่อ 100 กรัม) ตามด้วย ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียม (3.35 และ 0.83 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ) และมีวิตามิน บีรวม โดยไนอาซิน (วิตามิน บี3) มีปริมาณสูงสุด 104 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามด้วย วิตามิน บี6 บี2 และ บี1 (1.874, 0.468 และ 0.206 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ) โปรตีนอัลบูมินมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10 ถึง 60 กิโลดัลตัน มีกรดอะมิโนจำเป็น 2.29-8.48 กรัมต่อ 100 กรัม โปรตีน ผลการศึกษาฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งเต้านม เซลล์มะเร็งต่อมลูกหมาก เซลล์มะเร็งตับ และเซลล์มะเร็งปากมดลูก พบว่าที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีฤทธิ์ยับยั้งสูงสุดที่ร้อยละ 56.15±2.94, 27.77±4.42, 63.58±4.59 และ 62.88±0.56 ตามลำดับ จึงเห็นได้ว่าโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อินทรีย์ มีศักยภาพใช้เป็นอาหารเสริมสุขภาพ ในอุตสาหกรรมอาหารและยาต่อไป

ABSTRACT

The aim of this research was to analyze the characterization and anti-cancer cells activities of albumin extracted from cold pressed organic Khao Dawk Mali 105 rice bran (CPRB). The protein and phenolic content of the extract were 16.62% and 1.69% g GAE, respectively. The highest mineral in the extract was potassium (4.75 mg/100g) followed by phosphorus and magnesium (3.35 and 0.83 mg/100g, respectively). Niacin (vitamin B3) was the highest vitamin B complex content of 104 mg /100g followed by vitamin B6 B2 and B1 (1.874, 0.468 and 0.206 mg/100g, respectively). The albumin protein has a molecular weight of 10-60 kDa. The essential amino acids ranges from 2.29-8.48 g/ 100g protein. Moreover, albumin extract at concentration of 1 mg/mL could inhibit cancer cells growth; breast cancer cells, prostate cancer cells, liver cancer cells and cervical cancer cells (at the maximum 56.15±2.94, 27.77±4.42, 63.58±4.59 and 62.88±0.56 %, respectively). It indicates that, the albumin protein from CPRB has potential to be used as health supplements in the food and nutraceuticals industries.

Key Words: rice bran protein, albumin, protein characterization, anti-cancer cells

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

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, 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

รำข้าวเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการขัดสีข้าวกล้องให้เป็นข้าวขาว มีปริมาณน้ำมันสูง อุดมไปด้วยโปรตีน เส้นใย และกรดไขมันไม่อิ่มตัว นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุและวิตามินบีรวม (วิตามิน บี1 บี2 บี3 บี5 และ บี6) รำข้าวที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกไปแล้วจะมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 12-15 ซึ่งไม่ต่างจากรำข้าวเริ่มต้น จึงสามารถนำมาใช้สกัดโปรตีนเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่ได้จากพืช ที่มีคุณภาพทางโภชนาการเทียบเท่าหรือสูงกว่าธัญพืชอื่นๆ โปรตีนจากข้าวจำแนกตามสมบัติการละลาย ได้แก่ อัลบูมิน (albumin) ละลายในน้ำ โกลบูลิน (globulin) ละลายในเกลือ กลูเตลิน (glutelin) ละลายในด่างและกรด และโพรลามิน (prolamin) ละลายในอัลกอฮอล์ (Fabian and Ju, 2011) สัดส่วนของโปรตีนแต่ละชนิดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และกระบวนการสกัด การศึกษาแนวทางการสกัดโปรตีนที่มีอยู่ในรำข้าวด้วยการใช้น้ำ เป็นวิธีที่มีความนิยมมากกว่าการใช้สารเคมี เนื่องจากไม่ทำลายโครงสร้าง และไม่ทำให้โปรตีนสูญเสียสภาพธรรมชาติ แล้วยังสามารถละลายน้ำได้ดี จึงง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์ สารสกัดโปรตีนที่ได้มีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น เพราะองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลิกด้วย ซึ่งทำให้สารสกัดที่ได้มีฤทธิ์ต้านสารอนุมูลอิสระ ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของเนื้อเยื่อ Rukmini (2003) รายงานว่าสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากรำข้าว สามารถยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็ง อีกทั้งคุณสมบัติทางเคมีบำบัดของรำข้าว เกิดจากพฤษเคมีที่มีอยู่ในรำข้าว ได้แก่ กรดไฟติก สารประกอบฟีนอลิก ซึ่งสารเหล่านี้สามารถยับยั้งการเกิดโรคมะเร็ง โดยการควบคุมปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Law *et al*., 2017) จากงานวิจัยของ Seelachan *et al*. (2015) ได้สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าว ศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่าสารสกัดที่ได้ มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่า IC_{50} เท่ากับ 0.544 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงสารมาตรฐาน BHT (0.172 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบ สมบัติ และฤทธิ์การยับยั้งเซลล์มะเร็งของโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวอินทรีย์ขาวดอกมะลิ 105 หีบเย็นสกัดน้ำมัน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการใช้สารสกัดโปรตีนจากรำข้าว เพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

รำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อินทรีย์ หีบเย็นสกัดน้ำมัน จากบริษัทเมดิฟูดส์ ประเทศไทย จำกัด

การสกัดโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อินทรีย์ หีบเย็นสกัดน้ำมัน

การสกัดโปรตีนอัลบูมิน ดัดแปลงวิธีจาก Adebiyi *et al*. (2009) และ Seelachan *et al*. (2016) โดยใช้รำข้าวผสมกับน้ำ สกัดในสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสม จากนั้นนำสารสกัดโปรตีนอัลบูมินที่ละลายน้ำได้ ทำแห้งโดยใช้เทคโนโลยีแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ (Freeze dry)

องค์ประกอบ สมบัติและฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งของสารสกัดโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อินทรีย์ หีบเย็นสกัดน้ำมัน

สมบัติทางกายภาพ

วิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Spectrophotometer ยี่ห้อ Konica Minolta รุ่น CM-3500d)

สมบัติทางเคมี

- องค์ประกอบโดยประมาณ; คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้า ความชื้น (AOAC, 2006)

- ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ดัดแปลงจากวิธีของ Lim *et al*. (2007) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร คำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทดสอบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิค

- วิเคราะห์แร่ธาตุ (USEPA, 1996) และวิตามิน (Chase *et al*., 1993)

- หาขนาดโมเลกุล ด้วย SDS-Polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) (Laemmli, 1970) ใช้ separating gel ที่ร้อยละ 15 และ stacking gel ที่ร้อยละ 4 ย้อมสีแผ่นเจลด้วย Coomassie Brilliant Blue R-250 ล้างด้วยสารละลาย Destaining จนกระทั่งเห็นแถบโปรตีน

- ปริมาณกรดอะมิโนและกรดอะมิโนอิสระของสารสกัดโปรตีนอัลบูมินด้วย HPLC (Water Alliance 2695 with heater) ผ่าน Hypersil Gold column ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็ง

ทดสอบฤทธิ์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็ง ด้วยวิธี MTT (Kishore *et al*., 2014; Oliveira *et al*., 2015 และ Sagar *et al*., 2014) การทดสอบการมีชีวิตรอดของเซลล์ (cell viability) โดยการวัดความสามารถการทำงานของเอนไซม์ succinate dehydrogenases ในไมโทคอนเดรียของเซลล์ที่มีชีวิต โดยทดสอบกับเซลล์มะเร็งได้แก่ เซลล์มะเร็งเต้านม (MCF-7 cells), เซลล์มะเร็งต่อมลูกหมาก (DU-145 cells), เซลล์มะเร็งตับ (HepG2 cells) และ เซลล์มะเร็งปากมดลูก (Hela cells) ใช้วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร และทำการคำนวณค่าร้อยละความเป็นพิษของสารตัวอย่างต่อเซลล์มะเร็งแต่ละชนิด ดังสมการด้านล่าง

$$\% \text{ Cell cytotoxicity} = 100 - \left(\frac{A_{560}\ \text{Sample}}{A_{560}\ \text{Control}} \text{ X } 100 \right)$$

โดยที่ A_{560}Sample=ค่าการดูดกลืนแสงของสารทดสอบ, A_{560}Control=ค่าการดูดกลืนแสงของกลุ่มควบคุม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสกัดโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อินทรีย์ หีบเย็นสกัดน้ำมัน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อินทรีย์ หีบเย็นสกัดน้ำมัน แสดงในตารางที่ 1 พบว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรต ตามด้วย ไขมัน โปรตีน และเถ้า (ร้อยละ 40.12, 17.12, 14.87 และ 9.98 ตามลำดับ) ได้ผลผลิตผงสารสกัดโปรตีนร้อยละ 22.15 เมื่อเทียบกับ ผลผลิตโปรตีนอัลบูมิน โดย Adebiyi *et al*., (2009) สกัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 องศาเซลเซียส ให้ผลผลิต (ร้อยละ 4.9±0.6) น้อยกว่าการสกัดในการทดลองนี้

Table 1 Proximate composition of cold pressed organic Khao Dawk Mali 105 rice bran (CPRB) and albumin extract

Sample	Protein	Fat	Ash	Fiber	Carbohydrate	Moisture
CPRB	14.87±0.02	17.12±0.50	9.98±0.03	11.01	40.12	6.90±0.11
Albumin	16.62±0.21	5.92±0.04	16.03±0.05	0.60	54.29	6.55±0.16

Average value (n=3) ±SD

องค์ประกอบ สมบัติและฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งของสารสกัดโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อินทรีย์ หีบเย็นสกัดน้ำมัน

สมบัติทางกายภาพ

นำผงสารสกัดโปรตีนอัลบูมินที่ได้ วัดค่าสีแบบระบบ CIE L*a*b* color scale มีค่าความสว่าง (L*) ที่ 75.63±0.66 มีค่าสีแดง (a*) 2.86±0.13 และสีเหลือง (b*) 17.51±0.12 ดังภาพที่ 1 A โปรตีนอัลบูมินมีค่าความสว่างสูง มีลักษณะสีเหลืองนวลหากนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์จะมีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ได้น้อย

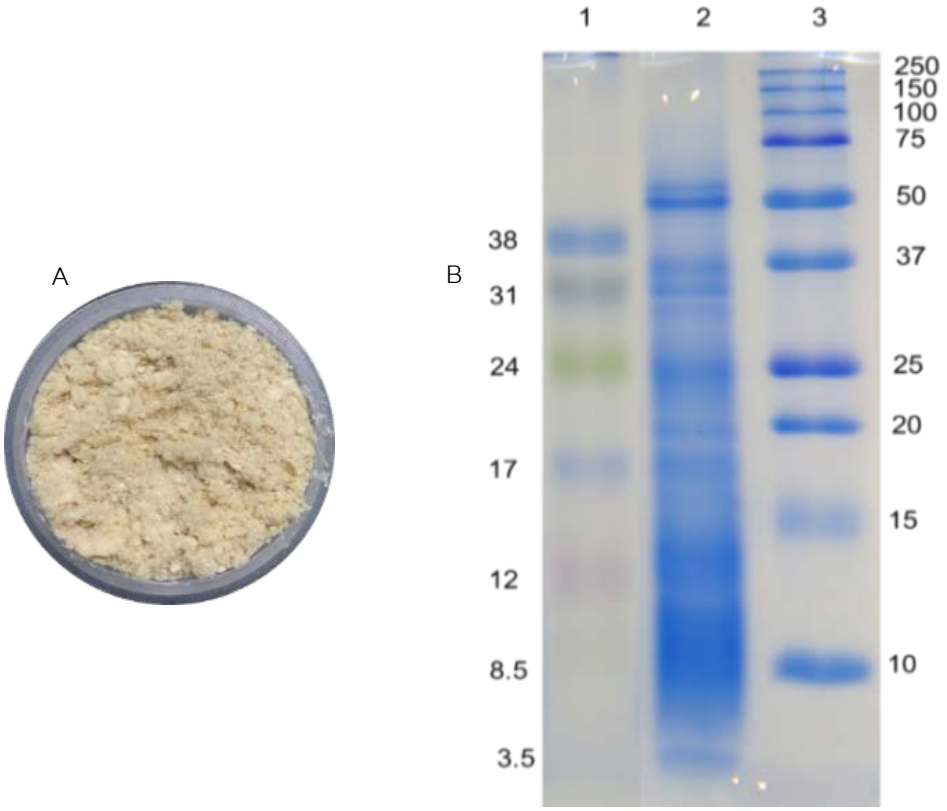


Figure 1 Rice bran albumin protein extract powder (A). Protein patterns and the molecular weight marker by sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE); 1, 3=Standard marker; 2= Albumin extract (B)

สมบัติทางเคมี

องค์ประกอบโดยประมาณของโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าว มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุด(ร้อยละ 54.29) รองลงมาคือโปรตีน เถ้า ไขมัน และเยื่อใย 16.62±0.21, 16.03±0.12, 5.92±0.04 และ 0.60 ตามลำดับ และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกร้อยละ 1.69±0.02 กรัม GAE ที่ความชื้นร้อยละ 6.55±0.16 (ตารางที่ 1)

ขนาดโมเลกุลของโปรตีนอัลบูมิน เทียบกับแถบโปรตีนมาตรฐาน ในภาพที่ 1 B จะเห็นว่าโปรตีนมีขนาดที่แปรผันในช่วงกว้างมีขนาดต่ำกว่า10 ถึง 60 กิโลดัลตัน (ช่องที่ 2) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Chanput *et al.* (2009) ที่สกัดแยกโปรตีนจากรำข้าว ได้ขนาดโมเลกุลของโปรตีนอัลบูมินอยู่ที่ 10 ถึง 60 กิโลดัลตัน ส่วน Adebiyi *et al.* (2009) พบว่าสกัดโปรตีนอัลบูมินด้วยน้ำจะมีขนาด 66 กิโลดัลตัน

ผลการวิเคราะห์แร่ธาตุของสารสกัดโปรตีนอัลบูมิน (ตารางที่ 2) พบว่า โปแตสเซียมเป็นแร่ธาตุที่พบได้สูงที่สุด 4.75 กรัมต่อ 100 กรัม ตามด้วย ฟอสฟอรัสและแมกนีเซียม (3.37และ 0.83 กรัมต่อ 100 กรัม

ตามลำดับ) เมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อินทรีย์ หีบเย็นสกัดน้ำมัน พบว่าโปแตสเซียม และฟอสฟอรัส มีปริมาณน้อยกว่าสารสกัดเล็กน้อย (2.17 และ 2.12 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ) Rukmini (2003) รายงานว่ารำข้าวและสารสกัดจากรำข้าวมีปริมาณ ฟอสฟอรัส โปรแตสเซียม แมกนีเซียม แมงกานีส และสังกะสี สูงกว่า รำข้าวโพด รำข้าวโอ๊ต และรำข้าวสาลี

Table 2 Mineral composition of cold pressed organic Khao Dawk Mali 105 rice bran (CPRB) and albumin extract

Sample	P (g/100g)	K (g/100g)	Mg (g/100g)	Ca (mg/100g)	Mn (mg/100g)	Fe (mg/100g)	Zn (mg/100g)
CPRB	2.12	2.17	0.86	49.60	13.80	4.66	5.50
Albumin	3.37	4.75	0.83	37.29	8.33	6.80	3.05

ส่วนปริมาณวิตามิน (ตารางที่ 3) พบว่า สารสกัดโปรตีนมีวิตามิน บี3 (ไนอาซิน) สูงสุด 104 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม รองลงมาคือ วิตามิน บี6 บี2 และ บี1 (1.874, 0.468, 0.206 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ) สอดคล้องกับปริมาณที่พบในรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 หีบเย็นสกัดน้ำมัน ที่มีวิตามิน บี3 สูงสุด 45.7 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ในสารสกัดมีสูงกว่าเท่าตัว ส่วนวิตามิน บี2 ในรำข้าวมี 0.04 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม แต่น้อยกว่าสารสกัด 100 เท่า ยกเว้นวิตามิน บี1 0.73 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม มากกว่าสารสกัดเกือบ 3 เท่า Rukmini (2003) รายงานว่าวิตามิน บี3 บี1 และบี6 พบได้ในรำข้าวสูงกว่าใน รำข้าวโพด รำข้าวโอ๊ต และรำข้าวสาลี และอธิบายว่าวิตามินบี1 เป็นศูนย์กลางการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรตและการทำงานของวัฏจักรเครป (Kreb's cycle) วิตามินบี3 มีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์สารตั้งต้นของ NAD (nicotinamide adenine dinucleotide-oxidized form) ซึ่งเป็นสารสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการผลิตพลังงานภายในเซลล์ นอกจากนี้ วิตามิน บี3 ยังส่งเสริมระดับคอเลสเตอรอลที่ดีต่อสุขภาพ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่ปลอดภัย ในการปรับระดับคอเลสเตอรอล และวิตามิน บี6 ช่วยในการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดป้องกันโรคระบบประสาทส่วนปลายในผู้ป่วยโรคเบาหวาน และปรับปรุงระบบภูมิคุ้มกัน

Table 3 Vitamin B1, B2, B3 and B6 composition (mg/100g) of cold pressed organic Khao Dawk Mali 105 rice bran (CPRB) and albumin extract

Sample	Vitamin B1	Vitamin B2	Vitamin B3 (Niacin)	Vitamin B6
CPRB	0.73	0.04	45.70	ND
Albumin	0.21	0.47	104.00	1.87

ND=Not Detected

สารสกัดโปรตีนอัลบูมิน มีปริมาณกรดอะมิโนทั้งหมดอยู่ในช่วง 1.81-14.98 กรัมต่อ 100 กรัมโปรตีน มีปริมาณกรดอะมิโน กลูตามิกมากที่สุด รองลงมาคือ อาร์จีนีน และกรดแอสปาร์ติก (ตารางที่ 4) และประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิดที่จำเป็น (essential amino acids) ได้แก่ อาร์จินีน ฮีสทิดีน ไอโซลิวซีน ลิวซีน ไลซีน เฟนิลอะลานีน เทรโอนีน และวาลีน อยู่ในช่วง 2.29-8.48 กรัมต่อ 100 กรัมโปรตีน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wang *et al*. 2015 ที่ได้รายงานผลการวิเคราห์กรดอะมิโนของโปรตีนรำข้าว และโปรตีนอัลบูมิน พบว่ามี

ปริมาณกรดอะมิโนอยู่ในช่วง 1.51-15.09 กรัมต่อ100กรัมโปรตีน ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณกรดอะมิโนของอัลบูมินในการทดลองนี้ นอกจากนี้ Wang *et al.* (2015) รายงานว่าโปรตีนรำข้าวมีปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็น ได้แก่ วาลีน เมไทโอนิน ลูซีน เฟนิลอลานีน และ ฮีสติดีน สูงกว่าโปรตีนจากถั่วเหลือง ส่วนปริมาณกรดอะมิโนอิสระพบอยู่ในช่วง 0.06-1.87 กรัมต่อ 100 กรัมโปรตีน เป็นกรดอะมิโนที่ร่างกายสามารถนำไปใช้ได้เลย

Table 4 Total amino acid and free amino acid composition (g/100g protein) of albumin extract

Amino acid	Total Amino acid	Free Amino acid
Glutamic acid	14.98	1.87
Arginine	8.48	0.66
Aspartic acid	8.42	0.90
Alanine	5.90	0.48
Glycine	5.72	0.24
Lysine	5.17	0.36
Leucine	4.93	0.18
Serine	4.33	1.02
Valine	4.15	0.18
Threonine	3.85	0.12
Proline	3.43	0.12
Phenylalanine	3.13	0.18
Histidine	2.65	0.12
Isoleucine	2.29	0.06
Tyrosine	1.81	0.18

ฤทธิ์การยับยั้งการเจริญเของเซลล์มะเร็ง

ผลการทดสอบฤทธิ์การยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งของสารสกัดโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวที่ความเข้มข้น 0.01-1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่าสามารถยับยั้งเซลล์มะเร็งเต้านม (MCF-7 cells) เซลล์มะเร็งต่อมลูกหมาก (DU-145 cells) เซลล์มะเร็งตับ (HepG2 cells) และ เซลล์มะเร็งปากมดลูก (Hela cells) ที่ร้อยละ 56.15±2.94, 27.77±4.42, 63.58±4.59 และ 62.88±0.56 ตามลำดับ ซึ่งให้ผลที่ดีกว่า ฟลูออโรยูราซิล (Fluorouracil) เป็นยาที่ใช้ในการรักษาโรคมะเร็งได้หลายชนิด ที่เป็นหนึ่งในสารควบคุมด้านบวก จากภาพที่ 2 จะเห็นว่าต้องใช้ฟลูออโรยูราซิลที่ความเข้มข้นสูงถึง 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จึงจะสามารถทำให้เซลล์มะเร็งตายได้เท่ากับสารตัวอย่างทั้งหมด ($p < 0.05$) และที่สารสกัดโปรตีนอัลบูมินที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีความสามารถในการยับยั้งเซลล์มะเร็งต่อมลูกหมาก (ร้อยละ11.17±1.47) และเซลล์มะเร็งตับ (ร้อยละ 11.98±0.91) ไม่แตกต่างจากสารควบคุมเซลล์มะเร็งด้านบวก วินคริสติน (Vincristine) ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (ร้อยละ 11.69±2.36 และ 15.6±4.42) ซึ่งสารควบคุมจะเป็นยาเคมีบำบัดที่ใช้ในผู้ป่วยมะเร็งจะส่งผลข้างเคียงต่อผู้ใช้ แต่โปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวเป็นสารสกัดจากพืช มีศักยภาพในการยับยั้งเซลล์มะเร็ง Seelachan *et al.* (2016) รายงานผลการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของโปรตีนรำข้าวมีค่าการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) IC_{50} เท่ากับ 0.544 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และการต้านออกซิเดชัน FRAP มีค่า 148.66

มิลลิโมลต่อกรัม Moongngarm *et al.* (2012) รายงานการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดของจมูกข้าวในข้าวสีดำและข้าวสีแดงมีค่า IC_{50} 1.03 และ 1.15 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งการต้านอนุมูลอิสระต่ำกว่าโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าว สารต้านอนุมูลอิสระเป็นคุณสมบัติช่วยในการป้องกันการเสื่อมสภาพของเนื้อเยื่อที่อาจนำไปสู่โรคต่างๆรวมทั้งโรคมะเร็ง

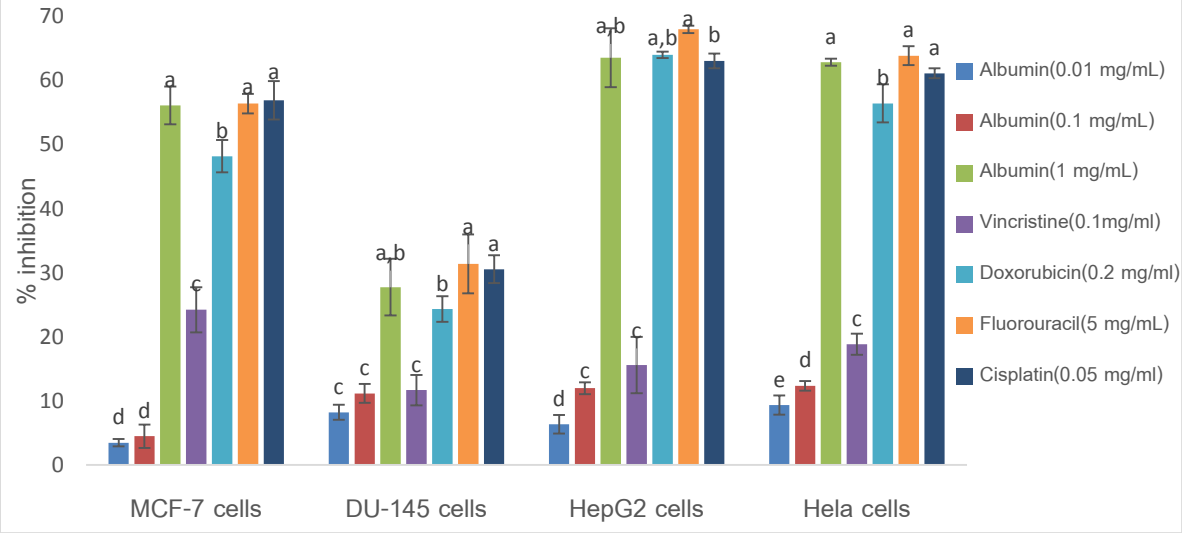


Figure 2 Anti-cancer cells activities of albumin extract (MCF-7 cells=Breast cancer cells, DU-145 cells=Prostate cancer cells, HepG2 cells=liver cancer cells and Hela cells=cervical cancer cells), a-e show the significant difference of statistically ($p \leq 0.05$)

สรุป

รำข้าวขาวดอกมะลิ 105 หีบเย็นสกัดน้ำมัน สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดโปรตีนอัลบูมิน ซึ่งสารสกัดที่ได้มีกรดอะมิโนที่จำเป็นครบถ้วนเมื่อเทียบกับโปรตีนจากพืชชนิดอื่น นอกจากโปรตีนแล้วสารสกัดที่ได้ยังมีสารประกอบฟีนอลิก แร่ธาตุ วิตามินบีรวม องค์ประกอบเหล่านี้พบเฉพาะในสารสกัดจากรำข้าว ยิ่งไปกว่านั้นยังมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งชนิดต่างๆ รวมทั้งเป็นโปรตีนที่ไม่ก่อให้เกิดการแพ้ ดังนั้นสารสกัดโปรตีนอัลบูมินจากรำข้าวสกัดน้ำมัน จึงมีศักยภาพสูงในการนำไปใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์เสริมอาหารเพื่อสุขภาพ ช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการในอาหารสำหรับเด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ป่วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทเมดิฟูดส์ ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ รำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อินทรีย์หีบเย็นสกัดน้ำมัน เป็นวัตถุดิบในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

AOAC. 2006. **Official Methods of Analysis of AOAC International**, 17th ed. The Association, Gaithersburg, MD.

Adebiyi, A.P., A.O. Adebiyi, Y. Hasegawa, T. Ogawa and K. Muramoto. 2009. Isolation and characterization of protein fractions from deoiled rice bran. **Europ Food Res and Tech**. 228(3): 391-401.

Chanput, W., C. Theerakulkait and S. Nakai. 2009. Antioxidative Properties of Partially Purified Barley Hordein, Rice Bran Protein Fractions and Their Hydrolysates. **J of Cereal Sci**. (3): 422-428.

Chase, G.W.Jr., W.O.Jr. Landen, A.M. Soliman and R.R. Eitenmiller. 1993. Liquid chromatographic analysis of niacin in fortified food products. **J AOAC Int**. 76: 390-393.

Fabian, C and Y.H. Ju. 2011. A Review on Rice Bran Protein: its Properties and Extraction Methods. **Crit Rev Food Sci Nutr**. 51(9): 816-827.

Kishore, N., B. Binneman, A. Mahapatra, M. van de Venter, D. du Plessis-Stoman, G. Boukes, P. Houghton, J.J. Marion Meyer and N. Lall. 2014. Cytotoxicity of synthesized 1, 4 naphthoquinone analogues on selected human cancer cell lines. **Bioorg Med Chem**. 22(17): 5013-5019.

Laemmli, U.K. 1970. Cleavage of Structural Proteins During the Assembly of Thehead of Bacteriophage T4. **Nature**. 227: 680-685.

Law, B.M.H., M.M.Y. Waye,W.K.W. So and S.Y. Chair. 2017. Hypotheses on the Potential of Rice Bran Intake to Prevent Gastrointestinal Cancer through the Modulation of Oxidative Stress. **Int J Mol Sci**. 18: 1-20.

Lim, Y.Y., T.T. Lim and J.J. Tee. 2007. Antioxidant Properties of Several Tropical Fruits: A Comparative Study. **Food Chem**. 103(3): 1003-1008.

Moongngarma, A., N. Daomukdaa and S. Khumpika. 2012. Chemical Compositions, Phytochemicals and Antioxidant Capacity of Rice Bran, Rice Bran Layer, and Rice Germ. **APCBEE Procedia**. 2: 73-79.

Oliveira, P.F.d, J.M. Alves, J.L. Damasceno, R.A.M. Oliveira, H.J. Dias, A.E.M. Crotti and D.C. Tavares. 2015. Cytotoxicity screening of essential oils in cancer cell lines. **Revista Brasileira de Farmacognosia**. 25(2): 183-188.

Rukmini, C. 2003. Phytochemical products: rice bran, pp. 347-376. In I. Johnson and G. Williamson, eds. **Phytochemical functional foods**. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, Cambridge, England.

Sagar, S., L. Esau, B. Moosa, N.M. Khashab, V.B. Bajic and M. Kaur. 2014. Cytotoxicity and apoptosis induced by a plumbagin derivative in estrogen positive MCF-7 breast cancer cells. **Anticancer Agents Med Chem**. 14(1): 170-180.

Seelachan, T., S. Tadakitisarn, P. Janchai and S. Yangngam. 2015. Physicochemical and Functional Properties of Protein and Protein Hydrolysates from Cold Pressed Rice Bran. **Knowledge of the Land towards Innovation for Sustainable Future**. 42:349 **Abstracts Food Science** 42 (2016): Abstracts I1_289_PA.

U.S. Environmental Protection Agency. 1996. **Method 3052: Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceousand Organically Based Matrices**. 2nd eds. U.S. Gov. Print. Office. Washington, DC.

Wang, C., F. Xu, D. Li and M. Zhang. 2015. Physico-chemical and Structural Properties of Four Rice Bran Protein Fractions Based on the Multiple Solvent Extraction Method. **Czech J Food Sci**. 33(3): 283-291.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์

Development of Nano Serum Containing Nanocapsule of Organic Coffee Oil

พัลลภา วุฒิภาพรกุล[1] อมร ไชยสัตย์[2] ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์[2] ภารดี อสุโกวิท[1] และ สุพนิดา วินิจฉัย[1*]

Punlapa Vutdhipapornkul[1], Amorn Chaiyasat[2], Preeyaporn Chaiyasat[2], Paradee Asugovit[1] and Supanida Winitchai[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ โดยทำการสกัดน้ำมันกาแฟอินทรีย์ด้วยวิธีซูเปอร์คริติคัลฟลูอิด (Supercritical fluid extraction, SFE) จากนั้นนำน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ที่ได้มากักเก็บด้วย Poly (lactic-acid) โดยเทคนิค Phase inversion emulsion เพื่อเป็นวัตถุดิบหลักในผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่ม โดยผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ที่พัฒนาได้มีลักษณะเป็นเนื้ออิมัลชันสีขาวขุ่น มีค่าสี L * a * และ b * เท่ากับ 78.53, -0.56 และ 1.41 ตามลำดับ มีค่า pH เท่ากับ 5.52 ค่าความหนืดเท่ากับ 499.50 เซนติพอยต์ ขนาดอนุภาคของอิมัลชัน มีค่าเท่ากับ 207 นาโนเมตร และมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ -18.27 มิลลิโวลต์ ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้ผ่านการทดสอบความคงตัว เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทดสอบคุณภาพทางคลินิก พบว่าภายหลังการทดสอบผลิตภัณฑ์นาน 2 เดือน ผิวของผู้ทดสอบมีปริมาณเม็ดสีเมลานินลดลง มีความยืดหยุ่นและความชุ่มชื้นของผิวหนังเพิ่มมากขึ้น และผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ผิวหนังด้วยวิธี MTT assay พบว่าผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ผิวหนัง

ABSTRACT

The objective of this research was to develop nano serum containing nanocapsule encapsulated organic coffee oil. Supercritical fluid extraction method (SFE) was used to obtain organic coffee after oil that prepared nanocapsule encapsulated organic coffee oil with poly–L-lactic acid and apply as active ingredient in nano serum product. The qualities of nano serum containing nanocapsule of organic coffee oil were opaque white with L*, a* and b* values of 78.53, -0.56 and 1.41, respectively. The pH and viscosity were 5.52 and 499.50 cP, respectively. The vesicular size of nano serum was 207 nm and -18.27 of zeta potential. The nano serum product passed the stability during storage. The results of clinical test showed that after 2 months usage the amount of melanin was decreased and skin moisture and skin elasticity were increased. The result of cytotoxicity by MTT cell proliferation assay showed that the nano serum product was non-toxic in skin fibroblasts cell.

Key Words: organic coffee oil, nanoserum, nanocapsule

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

[1] สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok, 10900

[2] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12120
Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, 12120

คำนำ

กาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจที่อุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด เช่น กรดคลอโรเจนิก (Chlorogenic acid) ไตรโกเนลไลน์ (Trigonalline) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญชนิดหนึ่ง ในขณะที่กากกาแฟที่เป็นเศษของที่เหลือใช้จากการชงกาแฟนั้นยังมีงานวิจัยไม่มากนักที่จะบ่งบอกถึงปริมาณของสารสำคัญ ซึ่งกากกาแฟเป็นสิ่งที่เหลือทิ้งจากธุรกิจกาแฟ โดยในปริมาณกาแฟ 1 กรัม จะได้กากกาแฟ 0.91 กรัม ซึ่งภายในเมล็ดกาแฟนั้นจะมีน้ำมันเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 11-20 ของน้ำหนัก และความชื้นมากกว่าร้อยละ 50 (Oliveira *et al.,* 2008) น้ำมันกาแฟจะได้จากการสกัดกาแฟบด เมล็ดกาแฟที่มีตำหนิ และกากกาแฟ น้ำมันกาแฟจัดเป็นน้ำมันที่มีคุณภาพสูง มีคุณสมบัติที่ดีต่อผิวหนัง โดยน้ำมันกาแฟสามารถกระตุ้นการสร้างคอลลาเจน, อิลาสติน และไกลโคอะมิโนไกลแคนในเซลล์ผิวหนังของมนุษย์ได้ (Pereda *et al.,* 2009) อีกทั้งน้ำมันกาแฟยังมีปริมาณของ Linoleic acid ที่สูง และมีความสามารถในการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลตได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางให้ความชุ่มชื้นผิว และเครื่องสำอางกันแดด (Wagemaker *et al.,* 2011) ทางด้านอุตสาหกรรมเครื่องสำอางยังไม่มีการนำเอาน้ำมันจากกากกาแฟที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมเครื่องดื่มกาแฟมาเพิ่มมูลค่ามากนัก โดยเฉพาะการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์นาโนอิมัลชันที่ผสมน้ำมันจากกากกาแฟ อย่างไรก็ตามจากประสบการณ์การวิจัยของทีมผู้วิจัย พบว่าการนำน้ำมันจากกากกาแฟที่จัดเป็นวัสดุเหลือใช้มาทำการกักเก็บด้วยเทคนิคต่างๆให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ยังคงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษา เพื่อที่จะสามารถนำมาต่อยอดเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางที่มีมูลค่าสูงได้ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำน้ำมันจากกากกาแฟที่จัดเป็นวัสดุเหลือใช้มาต่อยอดสู่ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น โดยนำน้ำมันกากกาแฟที่ได้มากักเก็บด้วย Poly (lactic-acid) โดยเทคนิคการเตรียมแบบกลับเฟส (phase inversion emulsion) จากนั้นนำแคปซูลนาโนพอลิเมอร์หุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ที่ได้มาเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่ม เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นให้แก่ผิว ช่วยเพิ่มความกระจ่างใส และสามารถลดเลือนริ้วรอยได้

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟโดยใช้วิธี Supercritical fluid extraction (SFE) **ที่สภาวะที่เหมาะสมตามวิธีของ** Araujo and Sandi, 2007 **และตรวจสอบค่าคุณภาพของน้ำมันกาแฟอินทรีย์**

สกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดที่มีเอทานอลเป็นตัวสกัดร่วม โดยการนำกากกาแฟมาสกัดด้วยเครื่อง Supercritical fluid extractor (รุ่น TH221-24x2 Supercritical CO_2 Extractions Device, China) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ใช้สภาวะการสกัด คือ ความดัน 27 MPa และอุณหภูมิ 50°C โดยสารที่ใช้สกัดประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดร้อยละ 90 และเอทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร จากนั้นนำน้ำมันกาแฟที่สกัดได้มาทำการตรวจสอบค่าคุณภาพ โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันด้วยเครื่อง GC-FID และทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (Jung *et al*., 2006)

2. การเตรียมพอลิเมอร์นาโนแคปซูลที่กักเก็บน้ำมันจากกากกาแฟอินทรีย์ด้วยเทคนิคการกลับเฟส

ทำการสังเคราะห์พอลิแอล-แลคติก แอซิด ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบบัลค์ (Bulk polymerization) เพื่อใช้เป็นพอลิเมอร์สำหรับหุ้มน้ำมันจากกากกาแฟ โดยเตรียมพอลิเมอร์นาโนแคปซูลในระบบอิมัลชันน้ำมันในน้ำ (Oil in water) ด้วยวิธีการระเหยตัวทำละลาย

3. การพัฒนาตำรับนาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์

คัดเลือกสูตรพื้นฐานที่เหมาะสมจำนวน 2 สูตร จากนั้นผลิตด้วยการลดขนาดอนุภาคของตำรับด้วยเครื่องไมโครฟลูอิดไดเซอร์ ที่สภาวะแรงดัน 10,000 psi จำนวนการผ่านเข้าเครื่อง 3 รอบ ทำการตรวจสอบค่าคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี ความคงตัวของสูตรพื้นฐาน และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อคัดเลือกสูตรพื้นฐานที่ดีที่สุด โดยทำการทดสอบดังนี้

3.1 ทดสอบค่าคุณภาพทางกายภาพและเคมี ได้แก่

- ค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Minolta รุ่น CM-3500d, ประเทศญี่ปุ่น
- ค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer, รุ่น BEL-D, ประเทศมาเลเซีย
- วัดขนาดอนุภาคระดับนาโนด้วยเครื่อง Zetasizer Nano ZS ยี่ห้อ Malvens, ประเทศสหรัฐอเมริกา
- ค่า pH ด้วยเครื่อง pH Meter ยี่ห้อ Eutech Instruments รุ่น pH 700 , ประเทศสิงคโปร์

3.2 ทดสอบความคงตัวของสูตรผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ โดยนำไปทดสอบด้วยวิธีวงจรร้อน – เย็น (40ºC – 4ºC) เป็นจำนวน 4 รอบ ทดสอบโดยนำผลิตภัณฑ์เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงแล้วย้ายไปเก็บที่อุณหภูมิ 4°C อีก 48 ชั่วโมง บันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยประเมินจากการวัดค่าคุณภาพทางกายภาพและเคมี

3.3 ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยนำผลิตภัณฑ์สูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตร มาประเมินความชอบในคุณลักษณะด้านความหนืด ความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้ออิมัลชัน การซึมเข้าสู่ผิว ความชุ่มชื้นผิว ความรู้สึกมันบนผิวหลังทา และความชอบโดยรวม โดยใช้การทดสอบความชอบแบบ 9-point hedonic scale และประเมินค่าความพอดีของคุณลักษณะด้านความหนืด ความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้ออิมัลชัน และความรู้สึกมันบนผิวหลังทา โดยใช้การทดสอบแบบ 5-point just about right (JAR) scale เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ ใช้จำนวนผู้ทดสอบเพศหญิง 30 คน อายุระหว่าง 30-50 ปี

4. ทดสอบประสิทธิภาพทางชีวภาพต่อผิวหนังทั้งก่อนและภายหลังการใช้ผลิตภัณฑ์

ทดสอบประสิทธิภาพทางชีวภาพต่อผิวหนังก่อนและหลังใช้ผลิตภัณฑ์ โดยใช้อาสาสมัครเพศหญิง จำนวน 8 คน อายุระหว่าง 30-50 ปี ซึ่งต้องเป็นผู้ที่มีสุขภาพดี ไม่เป็นโรคที่เกี่ยวกับผิวหนังหรือโรคติดต่อ และไม่มีประวัติการแพ้ยาหรือเครื่องสำอาง โดยทำการทดสอบดังนี้

4.1 การวัดสีผิว โดยวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเม็ดสีเมลานินในชั้น epidermis ของผิว ด้วยเครื่องวัดสีผิวหนัง Skin pigmentation analyzer (Courage & Khazaka, Colong, ประเทศเยอรมนี) โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบนาน 2 เดือน วัดค่าในทุกเดือน ทำการวัดค่า 3 ซ้ำ รายงานผลเป็นกราฟค่าเฉลี่ย Melanin value และ Erytherma value ของผู้ทดสอบก่อนและหลังใช้ผลิตภัณฑ์

4.2 วัดอัตราการระเหยของน้ำผ่านผิวหนัง (Transepidermal water loss, TEWL) ด้วยเครื่อง Tewameter TM 300 (Courage & Khazaka, Colong, ประเทศเยอรมนี) โดยก่อนการทดสอบจะให้ผู้ทดสอบอยู่ในห้องเพื่อปรับอุณหภูมิ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 20±2°C ความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ร้อยละ 40-60 กำหนดบริเวณที่จะทำการทดสอบเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมขนาด 4*4 ตารางเซนติเมตร ให้ผู้ทดสอบทำความสะอาดบริเวณที่จะทำการทดสอบ จากนั้นทาผลิตภัณฑ์บริเวณที่จะทำการทดสอบ วัดค่าก่อนทาผลิตภัณฑ์และหลังทาผลิตภัณฑ์นาน 15 นาที, 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง วัดค่าทั้งหมด 3 ซ้ำ รายงานผลเป็นกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการระเหยน้ำผ่านผิวหนังที่มีหน่วยเป็น g/hm^2 ก่อนและหลังใช้ผลิตภัณฑ์

4.3 ทดสอบความยืดหยุ่นผิวด้วยเครื่อง Cutometer MPA 580 (Courage & Khazaka, Colong, ประเทศเยอรมนี) โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบนาน 2 เดือน วัดค่าในทุกเดือน ทำการวัดค่า 3 ซ้ำ

4.4 วิเคราะห์ข้อมูลความแตกต่างทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for windows version 12.0, SPSS Inc., Thailand.

5. การทดสอบความเป็นพิษในเซลล์ผิวหนังด้วยวิธี MTT colorimetric assay

ทดสอบความเป็นพิษในเซลล์ผิวหนัง (skin fibroblasts) ด้วยวิธี MTT colorimetric assay โดยนำตัวอย่างที่เตรียมได้มาทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยวิธี MTT colorimetric assay เพื่อใช้บ่งบอกถึงปริมาณเซลล์ที่ยังมีชีวิตอยู่ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสี (colorimetric assay) จากสีเหลืองของ MTT เป็นผลึก formazan ที่มีสีม่วง โดยอาศัยปฏิกิริยาของเอนไซม์ mitochondrial reductase ซึ่งจะพบได้ในเซลล์ที่มีชีวิตเท่านั้น วิธีการทดสอบจะทดสอบโดยการใช้เซลล์ผิวหนังในอาหารเลี้ยงเซลล์ (Boonpisuttinant *et. al*., 2012)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟโดยใช้วิธี Supercritical fluid extraction (SFE)

นำกากกาแฟอินทรีย์ที่ผ่านการอบแห้งมาสกัดน้ำมันโดยใช้วิธี Supercritical fluid extraction (SFE) ทำการสกัดภายใต้สภาวะความดัน 27 MPa อุณหภูมิ 50°C สกัดนาน 8 ชั่วโมง พบว่าที่สภาวะดังกล่าวร้อยละผลผลิตที่ได้ของน้ำมันกาแฟอินทรีย์เท่ากับ 8.12 ลักษณะปรากฏของน้ำมันกาแฟเป็นน้ำมันที่มีสีน้ำตาลเข้มที่อุณหภูมิห้อง มีค่าสี L* a* และ b* เท่ากับ 24.79, -0.03 และ 1.22 ตามลำดับ มีค่าการหักเหแสงเท่ากับ 1.4789 ที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.9282 เมื่อตรวจคุณภาพของน้ำมันกาแฟอินทรีย์ โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันด้วยเครื่อง GC-FID และวิเคราะห์โครมาโตรแกรมด้วย Shimadzu GC solution software V.2.10 พบว่ามีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูงถึงร้อยละ 50.82 กรดไขมัน Oleic acid ร้อยละ 9.12 ซึ่งช่วยให้เนื้อสัมผัสของน้ำมันมีความบางเบา สามารถเพิ่มการดูดซึมเข้าสู่ชั้นผิวหนังได้ง่าย จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในกลุ่ม Emollient และมี Linoleic acid ร้อยละ 38.13 ที่ช่วยในเรื่องของกระบวนการฟื้นฟูสภาพผิวในชั้น stratum corneum โดยน้ำมันกาแฟมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (IC_{50}) เท่ากับ 2.31±0.13 mg/ml.

2. การเตรียมพอลิเมอร์นาโนแคปซูลที่กักเก็บน้ำมันจากกากกาแฟอินทรีย์ด้วยการกลับเฟสอิมัลชัน

เมื่อได้น้ำมันกาแฟที่ทำการสกัดด้วยวิธี Supercritical fluid extraction แล้ว จากนั้นนำมาศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์นาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกาแฟในระบบอิมัลชันน้ำมันในน้ำด้วยวิธีการระเหยตัวทำละลาย โดยการเตรียมหยดสารละลายพอลิเมอร์ด้วยวิธีการเตรียมหยดสารอินทรีย์แบบกลับวัฏภาค ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวก และสามารถเตรียมหยดสารอินทรีย์และพอลิเมอร์แคปซูลขนาดนาโนเมตรได้โดยไม่ต้องใช้แรงเฉือนสูงในการปั่น ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ง่าย โดยจากผลการทดสอบจะพบว่าการใช้พอลิแอล-แลคติก แอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้เกิดนาโนแคปซูลที่สมบูรณ์ มีความเสถียรทางคอลลอยด์สูง ไม่จับตัวเป็นก้อน เนื่องจากที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ สายโซ่พอลิเมอร์สั้นจะทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่เป็นเปลือกแคปซูลไม่แข็งแรง และไม่สม่ำเสมอ อาจจะมีน้ำมันกาแฟอยู่บริเวณผิวจำนวนมากกว่าการใช้พอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้นจึงเลือกพอลิแอล-แลคติก แอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูงในการหุ้มน้ำมันกาแฟ

3. การพัฒนาตำรับนาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์

ทำการคัดเลือกสูตรพื้นฐานที่เหมาะสมจำนวน 2 สูตร ทำการตรวจสอบค่าคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี ความคงตัวของสูตรพื้นฐาน และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อคัดเลือกสูตรพื้นฐานที่

ดีที่สุด โดยผลการวัดค่าคุณภาพทางกายภาพและเคมีของสูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตร พบว่าค่า pH ของสูตรพื้นฐานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 5.52±0.01 และ 5.11±0.01 ตามลำดับ มีค่าสี L* a* และ b* เท่ากับ 78.53±0.02, -0.56±0.01 และ 1.41±0.04 และ 84.73±0.03, 0.62±0.38 และ 3.41±0.01 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความหนืดของสูตรพื้นฐาน 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 499.50±3.24 และ 522.80±4.68 เซนติพอยต์ ตามลำดับ ซึ่งการที่ค่าความหนืดของสูตรพื้นฐานสูตร 2 สูงกว่าสูตร 1 เพราะมีลักษณะเป็นอิมัลชันที่ข้นหนืดกว่าอิมัลชันเจลของสูตร 1

ผลการทดสอบขนาดอนุภาคนาโนอิมัลชันในสูตรพื้นฐานที่ 1 และ 2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 207±1.96 และ 312±2.65 นาโนเมตร ส่วนค่าการกระจายตัวของอนุภาค (PDI) ซึ่งอธิบายถึงความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของอนุภาค โดยถ้าค่าใกล้เคียง 0 แสดงว่าอนุภาคกระจายเป็นเนื้อเดียวกัน พบว่าสูตรพื้นฐานที่ 1 และ 2 มีค่าการกระจายตัวเท่ากับ 0.27±0.03 และ 0.31±2.19 ตามลำดับ ส่วนค่าประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นความหนาแน่นของไอออนที่อยู่รอบๆ อนุภาคและประจุในของเหลวที่อยู่ล้อมรอบอนุภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการโคแอกกูเลชันฟล็อกคูเลชัน ซึ่งเป็นค่าที่สามารถบอกแนวโน้มว่าอนุภาคจะมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนหรือไม่ โดยอนุภาคแขวนลอยจะเสถียรเมื่อค่าศักย์ซีต้ามีค่ามากกว่า +30 หรือ น้อยกว่า -30 (มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าค่าประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ของสูตรพื้นฐานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ -18.27±2.55 และ -12.37±1.89 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสูตรพื้นฐานที่ 1 มีการเกาะตัวของอนุภาคคอลลอยด์ที่ดีกว่าสูตรพื้นฐานที่ 2 เนื่องจากมีค่าประจุที่ผิวมากกว่า ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1

Table 1 Physical and chemical properties of Basic Formula 1 and 2

Properties		Basic Formula	
		1	2
pH		5.52±0.01	5.11±0.01
Color	L*	78.53±0.02	84.73±0.03
	a*	-0.56±0.01	0.62±0.38
	b*	1.41±0.04	3.41±0.01
Viscosity (centipoise)		499.50±3.24	522.80±4.68
Size (nanometer)		207±1.96	312±2.65
Zeta Potential (mV)		-18.27±2.55	-12.37±1.89
Polydispersity Index		0.27±0.03	0.31±2.19

ผลการทดสอบความคงตัวทางด้านลักษณะปรากฏของสูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตร พบว่าสูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตรมีความคงตัวไม่แยกชั้น ค่าคุณภาพทางเคมีและกายภาพ ได้แก่ ค่า pH, ค่าความหนืด และค่าสี L*, a*, b* ของสูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตรที่ผ่านการทดสอบความคงตัว พบว่าเมื่อผ่านการทดสอบความคงตัวไป 4 รอบค่า pH ของสูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) เมื่อเทียบกับเริ่มต้นการทดสอบ ในขณะที่ค่าความหนืดของสูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตร มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq$0.05) เมื่อเทียบกับเริ่มต้น โดยมีค่าความหนืดลดน้อยลง แต่ไม่ส่งผลต่อความคงตัวของเนื้ออิมัลชัน ค่าสี L* ของสูตรพื้นฐานสูตร 2 เริ่มเปลี่ยนแปลงไปในรอบที่ 2 ส่วนสูตรพื้นฐานสูตร 1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสี L* ค่าสี a* ของ

สูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตรไม่มีการเปลี่ยนแปลง และค่าสี b* ของสูตรพื้นฐานสูตร 1 เริ่มเปลี่ยนแปลงในรอบที่ 4 ส่วนสูตรพื้นฐานสูตร 2 เปลี่ยนแปลงในรอบที่ 2 ของการทดสอบเมื่อเทียบกับเริ่มต้น

ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยนำสูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตรที่ผลิตได้มาประเมินความชอบในคุณลักษณะด้านความหนืด ความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้ออิมัลชัน การซึมเข้าสู่ผิว ความชุ่มชื้นผิว ความรู้สึกมันบนผิวหลังทา และความชอบโดยรวม โดยใช้การทดสอบความชอบแบบ 9-point hedonic scale และประเมินค่าความพอดีของคุณลักษณะด้านความหนืด ความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้ออิมัลชัน และความรู้สึกมันบนผิวหลังทา โดยใช้การทดสอบแบบ 5-point just about right (JAR) scale เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ ผลการทดสอบความชอบในด้านคุณลักษณะต่างๆ พบว่าสูตรพื้นฐานสูตร 1 มีค่าคะแนนความชอบในคุณลักษณะทางด้านความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้ออิมัลชัน การซึมเข้าสู่ผิว ความรู้สึกมันบนผิวหลังทา และความชอบโดยรวมมากกว่าสูตรพื้นฐานสูตร 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีคะแนนความชอบเฉลี่ยเท่ากับ 7.0±0.79 (ชอบปานกลาง) 6.7±1.22 (ชอบปานกลาง) 6.3±1.46 (ชอบน้อย) และ 6.7±1.11 (ชอบปานกลาง) ตามลำดับ ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2

Table 2 Mean liking score of Basic Formula 1 and 2 by 9-point hedonic scale

Attributes	9-point hedonic scale	
	Basic Formula 1	Basic Formula 2
Viscosity ^{ns}	6.7±1.42	6.5±1.42
Homogeneous of emulsion	7.0±0.79^{a}	6.8±1.29^{b}
Absorb to skin	6.7±1.22^{a}	6.0±1.19^{b}
Moisture of skin ^{ns}	6.8±1.21	6.0±0.89
Oiliness after test	6.3±1.46^{a}	5.5±1.21^{b}
Overall liking	6.7±1.11^{a}	6.0±1.16^{b}

Note: $^{a-b}$ the mean different letters within row are significantly different at $p \leq 0.05$

^{ns} the mean within the same row are non-significantly different at $p > 0.05$

ผลการประเมินความพอดีด้วยวิธี 5-point just about right (JAR) scale วิเคราะห์โดย Penalty analysis ของสูตรพื้นฐานทั้ง 2 สูตร ในคุณลักษณะด้านความหนืด ความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้ออิมัลชัน และความรู้สึกมันบนผิวหลังทา พบว่าคะแนนความรู้สึกด้านความพอดีของสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 เป็นสูตรที่มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากไม่ต้องปรับปรุงคุณลักษณะในด้านใด และมีค่าคะแนนความชอบโดยรวมมากกว่าสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 ดังนั้นสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 จึงได้รับการคัดเลือกเป็นสูตรผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของ นาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ โดยผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ที่พัฒนาได้แสดงดังภาพที่ 1

4. ทดสอบประสิทธิภาพทางชีวภาพต่อผิวหนังทั้งก่อนและภายหลังการใช้ผลิตภัณฑ์

ผลการวัดปริมาณเม็ดสีเมลานินบริเวณแก้มของผู้ทดสอบ พบว่าผู้ทดสอบมีปริมาณเม็ดสีเมลานินลดลงในทุกเดือนจนถึงเดือนที่ 2 โดยเริ่มต้นค่าปริมาณเม็ดสีเมลานินของผู้ทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 203.45 ถึง 212.29 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 208.41 เมื่อเวลาผ่านไปค่าปริมาณเม็ดสีเมลานินของผู้ทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 188.23 ถึง 208.94

มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 197.42 ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์มีผลทำให้ปริมาณเม็ดสีเมลานินบริเวณผิวหน้าของผู้ทดสอบมีค่าลดลง ส่งผลให้มีความหมองคล้ำลดลง ในขณะเดียวกันค่าเฉลี่ยอัตราการบวมแดงของผิวหน้าภายหลังการใช้ผลิตภัณฑ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับผิวแก้มของผู้ทดสอบก่อนการทดลองใช้ผลิตภัณฑ์ แสดงให้เห็นว่าการใช้ผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ไม่มีผลทำให้ผู้ทดสอบเกิดอาการแพ้หรือบวมแดง

ค่าอัตราการระเหยน้ำผ่านผิวหนัง (Transepidermal water loss: TEWL) ของผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่ม พบว่าก่อนทาผลิตภัณฑ์ผิวของผู้ทดสอบมีค่าอัตราการระเหยของน้ำเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4.43-13.43 g/h.m^2 หลังจากทาผลิตภัณฑ์ภายใน 15 นาที ค่าอัตราการระเหยน้ำที่ผิวของผู้ทดสอบลดลงทันที โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.79-8.74 g/h.m^2 เมื่อเวลาผ่านไปค่าอัตราการระเหยน้ำที่ผิวของผู้ทดสอบค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีค่าอัตราการระเหยน้ำที่ผิวเท่ากับก่อนใช้ผลิตภัณฑ์เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที (5 ชั่วโมง) นั่นหมายถึงว่าผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ที่พัฒนาได้มีความสามารถในการป้องกันการระเหยน้ำออกจากผิวได้ไม่น้อยกว่า 5 ชั่วโมง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพความยืดหยุ่นของผิวแก้มด้วยเครื่อง Cutometer MPA 580 พบว่าการใช้ผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์นาน 2 เดือน ทำให้ค่าความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มมากขึ้น และสามารถยกกระชับผิวหน้าได้ โดยค่า Ur/Uf หรือค่าความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเดิมของผิวหนังภายหลังจากการถูกกระทำด้วยแรงดูด มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการใช้ผลิตภัณฑ์ หรือหมายถึงสภาพผิวหนังที่มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นนั่นเอง

Figure 1 Nano serum containing nanocapsule of organic coffee oil

5. การทดสอบความเป็นพิษในเซลล์ผิวหนังด้วยวิธี MTT colorimetric assay

ผลการทดสอบความเป็นพิษในเซลล์ผิวหนังด้วยวิธี MTT colorimetric assay พบว่าผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ที่ทุกความเข้มข้น (0.0001 ถึง 1 mg/ml.) มีอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์มากกว่าร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม แสดงว่าตัวอย่างไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ผิวหนัง (Human Skin Fibroblasts Cells) (Buapool *et al*., 2013)

สรุปผลการทดลอง

การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟอินทรีย์ด้วยวิธี Supercritical fluid extraction (SFE) และนำน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ที่ได้มากักเก็บด้วย Poly (lactic-acid) โดยเทคนิคการเตรียมแบบกลับเฟส เพื่อเป็นวัตถุดิบหลักในผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่ม ผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ที่พัฒนาได้มีลักษณะเป็นเนื้ออิมัลชันสีขาวขุ่น มีค่าสี L * a * และ b * เท่ากับ 78.53, -0.56 และ 1.41 ตามลำดับ มีค่า pH เท่ากับ 5.52 ค่าความหนืดเท่ากับ 499.50 เซนติพอยต์ ขนาดอนุภาคของอิมัลชัน มีค่าเท่ากับ 207 นาโนเมตร มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ -18.27 มิลลิโวลต์ และมีค่าการกระจายตัวของอนุภาคเท่ากับ 0.27 เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้มาทดสอบความคงตัวพบว่าผลิตภัณฑ์ผ่านการทดสอบความคงตัว ไม่มีการแยกชั้น และตกตะกอน ผลการทดสอบคุณภาพทางคลินิก (ประสิทธิภาพทางชีวภาพต่อผิวหนัง) ของผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ พบว่าภายหลังการทดสอบนาน 2 เดือน ผิวของผู้ทดสอบมีปริมาณเม็ดสีเมลานินลดลง มีความยืดหยุ่นและความชุ่มชื้นของผิวหนังเพิ่มมากขึ้น และผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ผิวหนังด้วยวิธี MTT assay พบว่าผลิตภัณฑ์นาโนเซรั่มที่มีส่วนผสมของนาโนแคปซูลหุ้มน้ำมันกากกาแฟอินทรีย์ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ผิวหนัง

เอกสารอ้างอิง

Araujo, J. M. and D. Sandi. 2007. **Extraction of coffee diterpenes and coffee oil using supercritical carbon Dioxide**. Food Chemistry. 101(3): 1087–1094.

Boonpisuttinant, K., A. Manosroi, D. Rahmat and J. Monosroi. 2012. **Enhancement of in vitro membrane permeation and anti-proliferative on cancer cell lines of aqueous extracts from Thai anti-cancer medicinal plants by entrapping in chitosan and chitosan-TGA nanoparticles**. Advance Science Letters. 17: 206-216.

Buapool, D., N. Mongkol, J. Chantimal, S. Roytrakul, E. Srisook and K. Srisook. 2013. **Molecular mechanism of anti-inflammatory activity of Plucheaindica leaves in macrophages RAW 264.7 and its action in animal models of inflammation**. Ethnopharmacology. 4: 495-504.

Jung, B.K., B.K. Jong, J.C. Kang, M.K. Gabriele and D.W. Anthony. 2006. **Antioxidant activity of 3,4,5-Trihydroxy benzaldehyde Isolated from Geum japonicum**. Food & Drungnal. 14(2): 190-193.

Oliveira, L.S., A.S. Franca, R.R.S. Camargos and V.P. Ferraz. 2008. **Coffee oil as a potential feedstock for biodiesel production.** Bioresour Technol. 99(8): 3244–3250.

Pereda, M.D.C.V., G.D.C. Dieamant, S. Eberlin, C. Nogueira, D. Colombi, L.C.D. Stasi and M.L.D.S. Queiroz. 2009. **Effect of green *Coffea arabica* L. seed oil on extracellular matrix components and water-channel expression in *in vitro* and *ex vivo* human skin models**. Cosmetic Dermatology. 8(1): 56-62.

Wagemaker, T.A.L., C.R.L. Carvalho, N.B. Maia, S.R. Baggio and O.G. Filho. 2011. **Sun protection factor, content and composition of lipid fraction of green coffee beans**. Industrial Crops and Products. 33: 469-473.

ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปังสูตรน้ำมันรำข้าว

Effect of Emulsifiers on the Quality of Bread by Using Rice Bran Oil

ปนิตา เล็กรุ่งเรืองกิจ[1*] และ เอกพันธ์ แก้วมณีชัย[1]

Panita Lekrungraungkit[1*] and Eakaphan Keowmaneechai[1]

บทคัดย่อ

เนื่องจากเนยขาวส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นส่วนผสมในสูตรขนมปังมีไขมันทรานส์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ จึงได้พัฒนาสูตรขนมปังที่ใช้น้ำมันรำข้าวทดแทนเนยขาว โดยทดสอบผลของการเติมอิมัลซิไฟเออร์เพื่อปรับปรุงคุณภาพ ได้แก่ distilled monoglyceride (DMG), sodium stearoyl lactylate (SSL) และ polysorbate 60 (P60) เมื่อใช้ชนิดและปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ (% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด) แตกต่างกันในขนมปัง 5 สูตร คือ ขนมปังที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (control), เติม DMG 0.2%, เติม DMG 0.1% + P60 0.1%, เติม SSL 0.2% และ เติม DMG 0.1% + SSL 0.1% พบว่าขนมปังสูตร control มีการสูญเสียน้ำจากการอบมากกว่า และปริมาตรจำเพาะน้อยกว่ากว่าสูตรที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ทุกสูตรอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งมีความชื้น และค่าสี L* ของเนื้อขนมปังต่ำกว่าสูตร SSL 0.2% และสูตร DMG 0.1% + SSL 0.1% อย่างมีนัยสำคัญ การใช้ SSL สามารถลดความแข็งของเนื้อขนมปังจากการเกิดสเทลิง (staling) ในระหว่างการเก็บรักษาได้ดีที่สุด ขนมปังสูตรเติม DMG 0.2% และสูตรเติม DMG 0.1% + SSL 0.1% มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบรวมมากกว่าสูตรอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ

ABSTRACT

Shortening used as an ingredient in bread recipes mostly contains trans fat that is harmful to health. Therefore, bread formulas using rice bran oil to replace shortening were developed in this study. The effects of emulsifiers on improving quality of bread were investigated. Emulsifiers including distilled monoglyceride (DMG), sodium stearoyl lactylate (SSL) and polysorbate 60 (P60) at the different amounts (% of total ingredient weight) were applied into 5 bread formulas: Control without emulsifiers, DMG 0.2%, DMG 0.1% + P60 0.1%, SSL 0.2% and DMG 0.1% + SSL 0.1%. It was found that the control had higher water loss upon baking and lower specific volume than the breads with emulsifiers significantly. In addition, the control had lower crumb moisture content and L* than SSL 0.2% and DMG 0.1% + SSL 0.1% significantly. SSL appeared to be the best in reducing the crumb hardness induced by bread staling during storage. The bread with DMG 0.2% and DMG 0.1% + SSL 0.1% had higher texture and overall preference scores than the other breads significantly.

Key Words: bread, emulsifier, hardness, rice bran oil, sensory, specific volume, staling

*Corresponding author; e-mail address: Panita12_pp@hotmail.com

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

[1]Department of Food technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000

คำนำ

ผลิตภัณฑ์ขนมปังโดยทั่วไปส่วนใหญ่ใช้เนยขาว (shortening) เป็นไขมันในสูตรส่วนผสม เนื่องจากเนยขาวมีสมบัติช่วยปรับปรุงคุณภาพในด้านเนื้อสัมผัส ความรู้สึกในปากขณะรับประทาน การกักเก็บอากาศ การส่งผ่านความร้อน และการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ (Lai และ Lin, 2007) แต่เนยขาวโดยทั่วไปเป็นไขมันหรือน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชันบางส่วน (partial hydrogenation) ซึ่งทำให้เกิดกรดไขมันทรานส์ (trans-fatty acid) ขึ้นในผลิตภัณฑ์เนยขาว (O'Brien, 2004) ซึ่งการบริโภคไขมันทรานส์มีผลเสียต่อสุขภาพ (List, 2014) จึงจำเป็นต้องมีงานวิจัยเพื่อทดลองใช้ไขมันชนิดอื่นทดแทนเนยขาวในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น งานวิจัยของ Bakota และคณะ (2014) ได้นำน้ำมันรำข้าวไปใช้ทดแทนเนยขาวบางส่วนเพื่อลดไขมันทรานส์ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง เนื่องจากน้ำมันรำข้าวมีสารต้านออกซิเดชันซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภค มีความคงตัวสูง มีกลิ่นรสที่ดี และช่วยยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามน้ำมันรำข้าวธรรมดาไม่มีส่วนผสมของวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) ประเภทอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพขนมปังเหมือนกับเนยขาว จึงจำเป็นต้องเติมวัตถุเจือปนอาหารประเภทนี้ในสูตรขนมปัง เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทำจากน้ำมันรำข้าว ทั้งนี้อิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมใช้กับขนมปังได้แก่ distilled monoglyceride (DMG), sodium stearoyl lactylate (SSL) และ polysorbate 60 (P60) (O'Brien, 2004) โดยอิมัลซิไฟเออร์ทำหน้าที่เป็นสารช่วยให้เนื้อขนมปังมีความแข็งแรงขึ้น (strengtheners) และสารช่วยให้เนื้อขนมปังมีความนุ่มมากขึ้น (softeners) เช่น Gomes-Ruffi และคณะ (2012) ได้ศึกษาคุณภาพของขนมปังที่เติม SSL พบว่าการเติม SSL ช่วยให้ขนมปังมีปริมาตรเพิ่มสูงขึ้น และมีความแน่นเนื้อ (firmness) น้อยลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ นอกจากนี้อิมัลซิไฟเออร์ยังช่วยลดการเกิดสเทลิง (staling) ในระหว่างการเก็บรักษาขนมปัง ซึ่งเกิดจากการจับเรียงตัวกันใหม่ของแอมิโลส (amylose) เป็นโครงสร้างผลึกมากขึ้น และมีการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากกลูเตนทำให้ขนมปังมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น (Stampfli และ Nersten, 1995) อิมัลซิไฟเออร์ในผลิตภัณฑ์ขนมปังอาจใช้ร่วมกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเพื่อให้ได้ผลดียิ่งขึ้น เนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพและลักษณะการทำงานแตกต่างกันไป แม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้น้ำมันรำข้าวในผลิตภัณฑ์ขนมปังมาบ้างแล้ว (Bakota และคณะ, 2014) แต่ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมอิมัลซิไฟเออร์ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ใช้น้ำมันรำข้าวเป็นส่วนผสมไขมันหลัก

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีจุดประสงค์ในการนำน้ำมันรำข้าวมาใช้ผลิตขนมปังทดแทนการใช้เนยขาว และตรวจสอบผลกระทบของการใช้อิมัลซิไฟเออร์ต่อคุณภาพของขนมปังในด้านกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัส

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมขนมปัง

ทำการเตรียมขนมปัง (ดัดแปลงจาก Melito และ Farkas, 2013) โดยนำแป้งสาลีชนิดทำขนมปัง 32.14% แป้งสาลีอเนกประสงค์ 16.07% นมผง 3.21% และผงวานิลลา 0.48% มาร่อนให้เข้ากัน เติมยีสต์ผง 0.96% แล้ว

ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปผสมกับไข่ไก่ 6.43% น้ำ 24.10% น้ำตาล 7.23% และเกลือ 0.48% ด้วยเครื่องผสม Kitchen Aid หัวตะขอที่ความเร็วระดับ 6 จนเข้ากัน แล้วจึงเติมน้ำมันรำข้าว 8.68% และอิมัลซิไฟเออร์ลงไป ผสมจนโดเนียน ทำการหมักโดนาน 60 นาที นำโดไปรีด และม้วนขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก บรรจุพิมพ์ขนาด กว้าง xยาวx สูง เท่ากับ 4x7x2.5 นิ้ว แบบไม่มีฝาปิด แล้วหมักอีกครั้งนาน 60 นาที อบที่อุณหภูมิ 180 ซ 20 นาที ในตู้อบลมร้อน

การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปัง

นำก้อนขนมปัง (bread loaf) และเนื้อขนมปัง (bread crumb) ไปทำการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ปริมาณการสูญเสียน้ำ (water loss) จากการอบก้อนขนมปัง โดยชั่งน้ำหนักก้อนโดก่อนอบ และก้อนขนมปังที่เย็นตัวหลังอบ แล้วนำมาคำนวณดังนี้

$$\text{การสูญเสียน้ำ (water loss) (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักโดก่อนอบ} - \text{น้ำหนักขนมปังหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักโดก่อนอบ}}$$

2. ความชื้น (moisture content) ของเนื้อขนมปังสด (วันที่ 0) โดยการอบแห้งในตู้อบลมร้อน (AOAC, 2000)

3. ปริมาตรจำเพาะ (specific volume) ของก้อนขนมปัง โดยวิธีการแทนที่ด้วยเมล็ดพืช (seed replacement) (Gomes-Ruffi และคณะ, 2012)

4. ค่าสีของเนื้อขนมปัง โดยเครื่องวัดสี (Color View spectrophotometer, Gardner Laboratory, USA)

5. สมบัติของเนื้อสัมผัสขนมปังโดยใช้เครื่อง texture analyzer (TA-xT2i, Stable Microsystems, England) ด้วยวิธี texture profile analysis (TPA) ซึ่งวิเคราะห์ในวันที่ 0, 1, 2, และ 3 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ^{o}ซ เพื่อตรวจสอบการเกิดสเทลิง โดยตัดตัวอย่างเนื้อขนมปังให้มีขนาด 3x3x2 เซนติเมตร ใช้หัววัดแบบ P50 ซึ่งเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กำหนดค่าความเร็วในช่วงก่อนการทดสอบเท่ากับ 4 มิลลิเมตร/วินาที ค่าความเร็วขณะทดสอบเท่ากับ 1 มิลลิเมตร/วินาที และค่าความเร็วในช่วงหลังการทดสอบเท่ากับ 4 มิลลิเมตร/วินาที และระยะทาง 50% ของรูปร่างที่เปลี่ยนไป (deformation)

6. คุณภาพด้านประสาทสัมผัสของเนื้อขนมปัง นำเนื้อขนมปัง ขนาด 5x5x1.5 เซนติเมตร หลังผลิตเสร็จ (วันที่ 0) มาประเมินความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบแบบสเกลฮีโดนิก 9 จุด (9 point-hedonic scale) โดยใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนทั้งหมด 30 คน

7. การวิเคราะห์ทางสถิติ ใช้แผนการทดลอง แบบ Completely Randomized Design (CRD) สำหรับการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมี และแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) สำหรับการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT (Duncan's New Multiple Range Test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ SPSS

ผลและวิจารณ์การทดลอง

ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการสูญเสียน้ำ ปริมาณความชื้น ปริมาตรจำเพาะ และค่าสีของขนมปัง

เมื่อนำขนมปังที่มีชนิดและปริมาณอิมัลซิไฟเออร์แตกต่างกันคือ สูตร Control ที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์, สูตรเติม DMG 0.2%, สูตรเติม DMG 0.1% + P60 0.1%, สูตรเติม SSL 0.2% และสูตรเติม DMG 0.1% + SSL 0.1% ไปทำการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำจากการอบของก้อนขนมปัง, ปริมาณความชื้นของเนื้อขนมปัง, ปริมาตรจำเพาะของก้อนขนมปัง และค่าสีของเนื้อขนมปัง ซึ่งเห็นได้ว่า สูตร Control สูญเสียน้ำสูงกว่าสูตรที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ทุกสูตรอย่างมีนัยสำคัญ และมีปริมาณความชื้นของเนื้อขนมปังต่ำกว่าสูตร SSL 0.2% และสูตร DMG 0.1% + SSL 0.1% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 1)

Table 1 Comparison of water loss, specific volume and moisture content of fresh breads (0 day) made from rice bran oil with different emulsifier types and contents

Formula	Water Loss (%)	Moisture Content (% wet basis)	Specific Volume (ml/g)
Control (no emulsifier)	6.31 ± 0.08 ^{a}	32.74 ± 0.55 ^{b}	3.27 ± 0.04 ^{c}
DMG 0.2%	4.42 ± 0.08 ^{b}	35.36 ± 1.05 ^{ab}	3.74 ± 0.07 ^{ab}
DMG 0.1% + P60 0.1%	5.11 ± 0.34 ^{b}	34.60 ± 0.39 ^{ab}	3.64 ± 0.11 ^{b}
SSL 0.2%	4.96 ± 0.66 ^{b}	36.87 ± 0.55 ^{a}	3.81 ± 0.05 ^{ab}
DMG 0.1% + SSL 0.1%	5.09 ± 0.43 ^{b}	36.60 ± 0.64 ^{a}	3.83 ± 0.05 ^{a}

Data are shown as the mean ± SD. Means within a column followed by different superscript letters are significantly different ($P \leq 0.05$)

จากการศึกษาการวัดปริมาตรจำเพาะ (Table 1) ซึ่งแสดงถึงการขึ้นฟูของก้อนขนมปัง พบว่าสูตรที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์มีปริมาตรจำเพาะสูงกว่าสูตร control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบการใช้อิมัลซิไฟเออร์แตกต่างกัน สูตรที่เติม DMG 0.1% + P60 0.1% มีปริมาตรจำเพาะน้อยกว่าสูตรที่เติม DMG 0.1% + SSL 0.1% อย่างมีนัยสำคัญ

ส่วนค่าสีของเนื้อขนมปัง (Table 2) ค่า L* แสดงถึงความสว่างของสีจะเห็นได้ว่า สูตรเติม SSL 0.2% และสูตรเติม DMG 0.1% + SSL 0.1% มีค่า L* สูงกว่าสูตร control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยทุกสูตรมีค่าสี a* ซึ่งแสดงถึงความเป็นสีแดง และค่า b* ซึ่งแสดงถึงความเป็นสีเหลืองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ลักษณะปรากฏของขนมปังแสดงดังภาพถ่าย Figure 1

Table 2 Comparison of color values of fresh breads (0 day) made from rice bran oil with different emulsifier types and contents

Formula	Color Value		
	L*	a* ns	b* ns
Control (no emulsifier)	81.01 ± 0.68 [b]	9.45 ± 0.08	21.82 ± 0.54
DMG 0.2%	82.15 ± 0.21 [ab]	9.66 ± 0.15	22.80 ± 0.06
DMG 0.1% + P60 0.1%	81.60 ± 0.84 [ab]	9.46 ± 0.16	22.44 ± 0.07
SSL 0.2%	82.71 ± 0.62 [a]	9.53 ± 0.11	21.93 ± 0.30
DMG 0.1% + SSL 0.1%	83.23 ± 0.60 [a]	9.43 ± 0.28	22.84 ± 1.35

Data are shown as the mean ± SD. Means within a column followed by different superscript letters are significantly different ($P \leq 0.05$). ns = not significant

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าอิมัลซิไฟเออร์สามารถปรับปรุงคุณภาพของขนมปังได้ เนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์ช่วยทำให้โดมีความแข็งแรงมากขึ้น (dough strengthener) โดยสร้างฟิล์มระหว่างสายโมเลกุลของกลูเตนและสตาร์ช จึงช่วยปรับปรุงการเกิดฟิล์มของกลูเตน ทำให้กักเก็บก๊าซในระหว่างการหมักได้ดีขึ้น ช่วยให้โครงสร้างของเนื้อขนมปังละเอียดขึ้นและมีปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สีของเนื้อขนมปังสว่างขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดการสูญเสียน้ำในระหว่างการอบ ทำให้ขนมปังมีความชุ่มชื้นมากขึ้น (Barry และ Tenny, 1983; Stampfli และ Nersten, 1995)

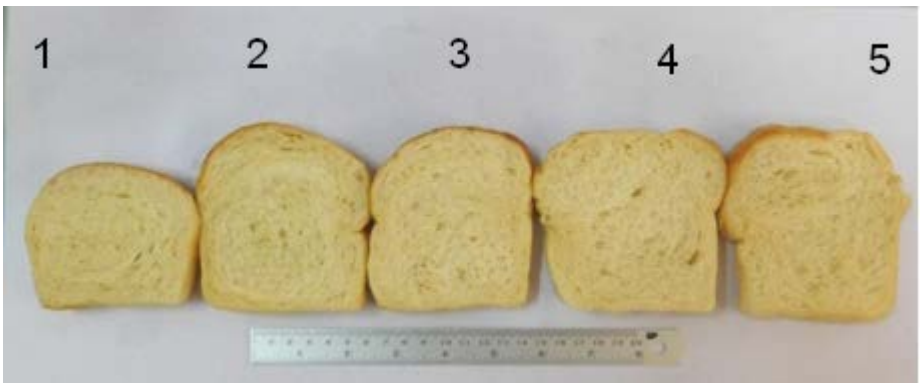


Figure 1 Fresh breads (0 day) made from rice bran oil with different emulsifier types and contents: (1) Control or no emulsifier, (2) DMG 0.2%, (3) DMG 0.1% + P60 0.1%, (4) SSL 0.2%, (5) DMG 0.1% + SSL 0.1%)

ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อสมบัติทางเนื้อสัมผัสของขนมปัง

การเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสเนื่องจากการเกิดสเทลิงถือเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพที่สำคัญของขนมปังในระหว่างการเก็บรักษา จากการทดลองเมื่อวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเนื้อขนมปัง โดยใช้เครื่อง texture analyzer ด้วยวิธี TPA ในวันที่ 0, 1, 2, และ 3 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °ซ เพื่อตรวจสอบการแข็งตัวของเนื้อขนมปังในระหว่างการเก็บรักษา หรือการเกิดสเทลิง ซึ่งทำให้สูญเสียลักษณะเนื้อสัมผัสที่นิ่ม และรสชาติที่ดีของขนมปัง พบว่าขนมปังสูตรเติม DMG 0.1% + SSL 0.1% มีค่าความแข็ง (แสดงใน Figure 2) ในวันที่ 0 น้อยที่สุด แต่เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 3 วัน พบว่าขนมปังสูตรเติม SSL 0.2% มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด รองลงมาคือ สูตรเติม DMG 0.1% + SSL 0.1% โดยพบว่าสูตรที่เติม SSL มีผลลดการเกิดสเทลิงได้ดี ทั้งนี้การใช้อิมัลซิไฟเออร์มีส่วนช่วยให้เนื้อสัมผัสของขนมปังดีขึ้น และยังพบว่าเป็นสารเพิ่มความนุ่ม (softener) ที่ทำให้เนื้อขนมปังมีความนุ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิมัลซิไฟเออร์และแอมิโลส ได้สารประกอบเชิงซ้อน (complex) ที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งทำให้สตาร์ชไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้ในระหว่างการอบ เมื่อเย็นตัวลงแอมิโลสจึงไม่เกิดโครงสร้างผลึกใหม่ที่จะทำให้เนื้อขนมปังแข็ง โดย Stampfli และ Nersten (1995) กล่าวว่าการใช้ SSL มีส่วนช่วยให้ขนมปังมีความนุ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับการใช้ DMG ส่วนการใช้ P60 จะช่วยให้ขนมปังนุ่มขึ้นน้อยกว่าการใช้ SSL และ DMG ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ใน Figure 2 เมื่อเปรียบเทียบการใช้ P60 ร่วมกับ DMG และการใช้ SSL ร่วมกับ DMG ที่พบว่าการใช้ SSL ร่วมกับ DMG สามารถลดการเกิดสเทลิงได้ดีกว่าการใช้ P60 ร่วมกับ DMG ดังนั้นการใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของสตาร์ชส่วนที่เป็นเกลียวแอมิโลส จึงมีส่วนช่วยลดการเกาะจับกันเองของโมเลกุลของสตาร์ชได้ มีผลให้ลดการเกิดรีโทรเกรเดชัน และการเกิดสเทลิงในขนมปังได้

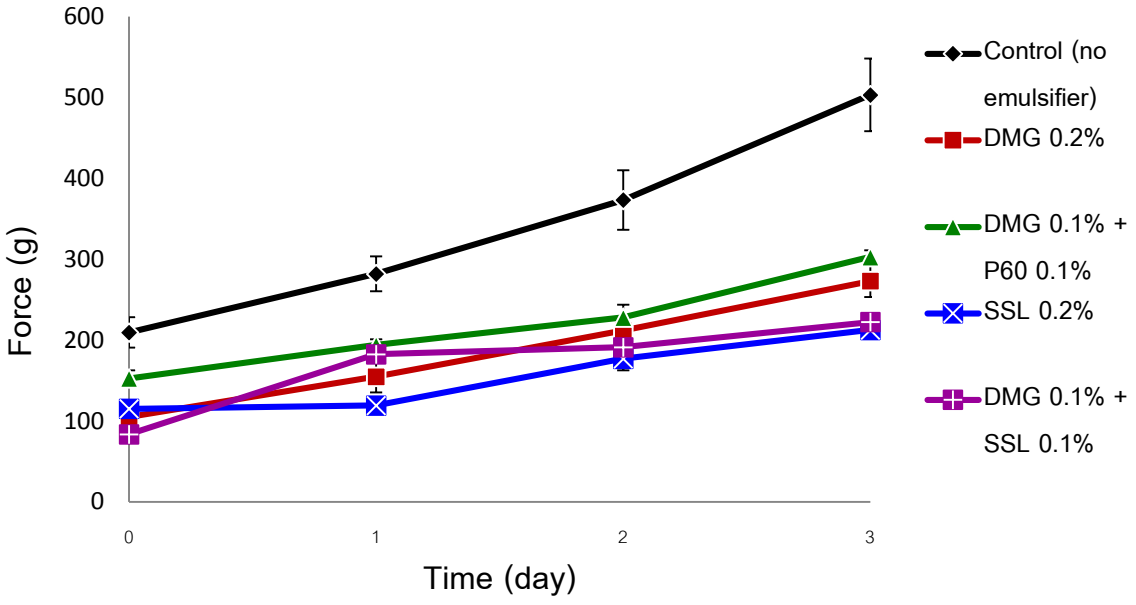


Figure 2 Changes in hardness of breads made from rice bran oil with different emulsifier types and contents

ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของขนมปัง

เมื่อนำขนมปังมาทดสอบทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบแบบสเกลฮีโดนิก 9 จุด โดยใช้ผู้ทดสอบทั้งหมด 30 คนได้ผลดังแสดงใน Table 4 ซึ่งพบว่าสูตรเติมอิมัลซิไฟเออร์มีคะแนนความชอบมากกว่าสูตร control อย่างมีนัยสำคัญ สูตรเติม DMG 0.2% และสูตรเติม DMG 0.1% + SSL 0.1% มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบรวมมากที่สุด เนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์ช่วยปรับปรุงโครงสร้างของขนมปังให้ดีขึ้น ทำให้เนื้อขนมปังมีฟองอากาศหรือรูพรุนมากขึ้นส่งผลให้ลักษณะปรากฏของเนื้อขนมปังดูโปร่งเบาไม่แน่นตัน ปริมาตรจำเพาะหรือการขึ้นฟูที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เนื้อขนมปังมีสีที่สว่างขึ้น การเกิดสเทลิงที่ลดลง นอกจากทำให้เนื้อขนมปังนุ่มขึ้นแล้ว ยังมีส่วนช่วยให้กลิ่นรสของขนมปังดีขึ้นด้วย (Stampfli และ Nersten, 1995)

Table 4 Sensory hedonic scores of fresh breads (0 day) made from rice bran oil with different emulsifier types and contents

Formula	Appearance	Color	Flavor	Texture	Overall
Control (no emulsifier)	6.07 ± 0.91^{b}	6.93 ± 0.25^{b}	5.80 ± 1.10^{b}	5.63 ± 1.16^{c}	5.20 ± 0.92^{c}
DMG 0.2%	7.53 ± 0.51^{a}	7.50 ± 0.57^{a}	7.83 ± 0.38^{a}	8.33 ± 0.48^{a}	8.37 ± 0.49^{a}
DMG 0.1% + P60 0.1%	7.23 ± 0.57^{a}	7.53 ± 0.51^{a}	7.77 ± 0.43^{a}	7.87 ± 0.82^{b}	7.70 ± 0.47^{b}
SSL 0.2%	7.33 ± 0.71^{a}	7.63 ± 0.49^{a}	7.80 ± 0.48^{a}	7.90 ± 0.31^{b}	7.87 ± 0.35^{b}
DMG 0.1% + SSL 0.1%	7.57 ± 0.50^{a}	7.73 ± 0.45^{a}	8.00 ± 0.45^{a}	8.40 ± 0.67^{a}	8.33 ± 0.55^{a}

Data are shown as the mean ± SD. Means within a column followed by different superscript letters are significantly different ($P \leq 0.05$)

สรุป

การใช้อิมัลซิไฟเออร์ช่วยปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ขนมปังให้ดีขึ้น ทั้งในด้านกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัส โดยพบว่า พบว่าขนมปังสูตร control มีการสูญเสียน้ำจากการอบ และปริมาตรจำเพาะมากกว่าสูตรที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ทุกสูตรอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งมีความชื้นของเนื้อขนมปัง และค่าสี L* ต่ำกว่าสูตร SSL 0.2% และสูตร DMG 0.1% + SSL 0.1% อย่างมีนัยสำคัญ การใช้ SSL สามารถลดความแข็งของเนื้อขนมปังและลดการเกิดสเทลิงในระหว่างการเก็บรักษาขนมปังได้ดีที่สุด ขนมปังสูตรเติม DMG 0.2% และสูตรเติม DMG 0.1% + SSL 0.1% มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบรวมมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

Bakoto, L. E., J. K. Winkler-Moser and H. Hwang. 2014. "Properties of rice bran oil-derived functional ingredients." **Lipid technology** 26: 179-181.

Gomes-Ruffi, C. R., R. H. Cunha, E. L. Almeida, Y. K. Chang and C. J. Steel. 2012. "Effect of the emulsifier sodium stearoyl lactylate and of the enzyme maltogenic amylase on the quality of pan bread during storage." **Food science and technology** 49: 96-101.

Lai, H. M. and T. C. Lin. 2007. **Bakery Products: Science and Technology**. Blackwell Publishing.

List, G. R. 2014. "Trans fat replacements: A global overview." **Lipid Technology** 26 (6): 131-133.

Melito, H. S. and B. E. Farkas. 2013. "Effect of infrared finishing process parameters on physical, mechanical and sensory properties of par-fried, infrared-finished gluten-free donuts." **Journal of Food Quality** 36 (1): 32-40.

O'Brien, R. D. 2004. **Fat and oils: formulating and processing for applications** (second edition). USA: CRC Press.

Rayas-Duarte, P and S. Mulvaney. 2012. "Bread staling." **Breadmaking**. United states: WoodheadPublishing Limited, 580-594.

Stampfli, L. and B. Nersten. 1995. "Emulsifiers in bread making." **Food chemistry** 52: 353-360.

การหมักปลาร้าที่มีส่วนผสมของแป้งแก่นตะวันด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์

Indigenous Fish Fermentation (Pla-ra) with Pure Lactic Acid Bacterial Culture Fortifying Jerusalem Artichoke Tuber Flour

ณัฐสิทธิ์ ฉันทจิตปรีชา[1] พฤทธิ์ ศรีรัตนจำรัส[1] ภัทราภรณ์ เนตรทอง[1] ศุภกิตติ์ เศวตภานุ[1]
ชื่นนภา ชูศรี[1] ชนิกา ชื่นแสงจันทร์[1] ศิวพร วรรณวิไล[1] และ สาโรจน์ ศิริศันสนียกุล[1*]
Natthasit Chanthachitpreecha[1], Pruet Sriratanachamras[1], Phattharaporn Netthong[1],
Suphakit Savetapanu[1], Chuennapha Chusri[1], Chaniga Chuensangjun[1], Siwaporn Wannwilai[1]
and Sarote Sirisansaneeyakul[1*]

บทคัดย่อ

การหมักปลาร้าด้วยการหมักระบบเปิดแบบพื้นบ้านอาศัยเชื้อจุลินทรีย์ธรรมชาติที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบในการหมัก จึงทำให้คุณภาพของปลาร้าไม่สม่ำเสมอ เสี่ยงต่อการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคและใช้เวลาการหมักนาน งานวิจัยนี้จึงพัฒนาการหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์ ได้แก่ *Lactobacillus pentosus* (Lp), *Lactobacillus acidipiscis* (La) และกล้าเชื้อผสมระหว่าง Lp และ La โดยใช้ปริมาณเกลือต่ำเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมข้าวคั่วและแป้งแก่นตะวันเป็นแหล่งอาหารคาร์บอนของจุลินทรีย์ และเสริมคุณค่าของโภชนเภสัชของปลาร้า บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในสภาวะนิ่งเป็นเวลา 7 วัน เมื่อเสร็จสิ้นการหมัก ปลาร้าจากกล้าเชื้อผสมผลิตกรดแล็กติกได้สูงสุด 0.602 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีอัตราการเจริญจำเพาะสูงที่สุด 0.787 ต่อวัน สุดท้ายปลาร้าจากการหมักด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์มีปริมาณเยื่อใยสูงที่ได้จากแป้งแก่นตะวัน (7.63-14.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) สูงกว่าปลาร้าจากวิธีการหมักแบบพื้นบ้าน 12.51-23.57 เท่า และมีปริมาณของไขมันและคาร์โบไฮเดรต (0.21-0.30 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ต่ำกว่าปลาร้าจากวิธีการหมักแบบพื้นบ้าน (1.38 และ 8.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และกำจัดกลิ่นเหม็นเน่าที่เกิดจากจุลินทรีย์ปนเปื้อนระหว่างการหมักได้

ABSTRACT

Indigenous fermented fish (Pla-ra) was produced by natural microorganisms derived from raw materials, resulting in an inconsistent quality, risk in contaminated pathogens and dramatically prolonged fermentation. This research developed fish fermentation by using pure lactic acid bacterial culture, i.e. *Lactobacillus pentosus* (Lp), *Lactobacillus acidipiscis* (La) and their mixed culture (Lp+La), and used low salt concentration (6 %w/w NaCl). Ground roasted rice and Jerusalem artichoke tuber powder were added into the fermentation mixture for microbial carbon source and enhanced nutraceuticals. After static fermentation at 37 °C for 7 days, the fermented fish obtained from the mixed culture showed the highest lactic acid concentration of 0.602 %w/w and the highest specific growth rate of 0.787 day^{-1}. Finally, the fermented fish (Pla-ra) produced by pure lactic acid bacterial culture resulted in 12.51-23.57 times higher fiber content (7.62-14.39 %w/w) with lower fat and carbohydrate content (0.23-0.30 and 0 %w/w), as compared to the natural Pla-ra fermentation (1.38 and 8.23 %w/w). Particularly, the off-flavor attribute of traditional Pla-ra was obviously removed.

Key Words: fish fermentation, Jerusalem artichoke tuber flour, lactic acid bacteria, mixed culture, Pla-ra

[*]Corresponding author; e-mail address: **sarote.s@ku.th**

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

คำนำ

ประเทศไทยมีผลิตภัณฑ์อาหารหมักพื้นบ้านหลายชนิด โดยปลาร้าเป็นอาหารหมักพื้นบ้านชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมบริโภคอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีต้นกำเนิดจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ ปัจจุบันปลาร้าได้รับความนิยมจากผู้บริโภคในระดับประเทศและภูมิภาคอาเซียน โดยปลาร้าเป็นส่วนประกอบของอาหารไทยหลายชนิดเพื่อเพิ่มกลิ่นและรสชาติของอาหารให้น่าชวนรับประทานยิ่งขึ้น (อานนต์, 2555) การผลิตปลาร้าผลิตโดยการหมักปลาที่มีเกลือและข้าวคั่วหรือรำข้าว ซึ่งเป็นวิธีการถนอมรักษาอาหารไว้บริโภคให้ได้นาน การหมักปลาร้าอาศัยบทบาทสำคัญของจุลินทรีย์ ได้แก่ แบคทีเรียที่ผลิตกรดแล็กติก ซึ่งจะทำให้อาหารมีรสเปรี้ยวกลมกล่อม และยังมีบทบาทสำคัญในการผลิตเอนไซม์ โปรทีเอส แอมีเลส และไลเพส ซึ่งสามารถย่อยสารอาหารประเภทโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ให้เป็นกรดอะมิโน น้ำตาล และกรดไขมันชนิดต่าง ๆ การผลิตปลาร้าในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังคงอาศัยเชื้อจุลินทรีย์ธรรมชาติที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบในการหมัก ทำให้การหมักเกิดการแข่งขันระหว่างจุลินทรีย์หลายชนิด โดยจุลินทรีย์ที่สามารถปรับตัวภายใต้สภาวะในการหมักที่มีความเข้มข้นเกลือสูงได้ดีจะเป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทหลักในการหมักปลาร้า การหมักตามสภาพธรรมชาติทำให้การเจริญของจุลินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นเป็นไปอย่างช้า ๆ ทำให้ผลิตภัณฑ์ปลาร้าจากกรรมวิธีการหมักแบบพื้นบ้านจึงต้องใช้ระยะเวลาในการหมักนาน (มากกว่า 5 สัปดาห์) นอกจากนี้ จุลินทรีย์ในธรรมชาติมีอยู่หลายชนิด ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้คุณภาพของปลาร้าไม่สม่ำเสมอและเสี่ยงต่อการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรค (ภณิดา, 2557)

ปลาร้าเป็นอาหารหมักที่ชื่นชอบของคนไทย แต่ยังคงมีผู้บริโภคจำนวนมากไม่นิยมรับประทานปลาร้าเนื่องจากปลาร้ามีกลิ่นที่รุนแรงเฉพาะตัว และปัญหาการสุขาภิบาลของกระบวนการหมักในระบบเปิดแบบพื้นบ้าน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยพัฒนากระบวนการหมักปลาร้าแบบระบบปิด ซึ่งอาศัยแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์ที่มีศักยภาพที่คัดสรรแล้ว ได้แก่ สายพันธุ์ *Lactobacillus pentosus* และ *Lactobacillus acidipiscis* (จีราพร, 2559) ในการหมักปลาร้าแบบถูกสุขลักษณะและอนามัย เพื่อป้องกันการเจริญของเชื้อโรคและจุลินทรีย์ปนเปื้อนที่ไม่ต้องการ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการหมักให้รวดเร็วยิ่งขึ้นและธำรงคุณภาพที่ดีของปลาร้าที่ผู้บริโภคต้องการ เนื่องจากการสร้างสภาวะการหมักที่เหมาะสม ซึ่งปราศจากการแข่งขันของจุลินทรีย์ปนเปื้อนในระยะเริ่มต้นของการหมัก ฉะนั้น นวัตกรรมวิธีการหมักปลาร้าสมัยใหม่นี้ย่อมส่งเสริมและสนับสนุนผู้ประกอบการในการเพิ่มกำลังการผลิตปลาร้าระดับอุตสาหกรรมสู่ภูมิภาคได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การหมักปลาร้าโดยใช้แบคทีเรียกรดแล็กติก บริสุทธิ์สามารถควบคุมคุณภาพที่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ปลาร้าและการลดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ของปลาร้าที่รุนแรงได้ นอกจากนี้ กรรมวิธีการหมักระบบปิดยังสามารถลดปริมาณของการใช้เกลือในการหมัก ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ปลาร้ามีปริมาณเกลือต่ำ ส่งผลดีต่อผู้บริโภคกลุ่มที่มีโรค/เสี่ยงต่อการเป็นโรคความดันโลหิตสูง โรคไต โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคกระดูกพรุน โรคมะเร็งกระเพาะอาหาร (วันทนีย์, 2555) สำหรับนวัตกรรมวิธีการหมักปลาร้านี้ยังได้พิจารณาการเพิ่มคุณค่าด้านโภชนเภสัชแก่ผลิตภัณฑ์ปลาร้าด้วยใยอาหารชนิดละลายน้ำ (อินูลิน) และพรีไบโอติก (ฟรักโทโอลิโกแซ็กคาไรด์) ที่ได้จากการเติมเยรูซาเล็มอาร์ทิโช้ค (แก่นตะวัน) ซึ่งเป็นสารอาหารที่สนับสนุนการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดดีในร่างกาย (พรอไบโอติก) ทำให้ผลิตภัณฑ์ปลาร้ายังช่วยการขับถ่ายสะดวกของผู้บริโภค โดยอินูลินและฟรักโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ไม่เป็นแหล่งพลังงานและไม่เพิ่มน้ำตาลในเลือดของผู้บริโภค (Yang *et al.*, 2015) ดังนั้น การพัฒนานวัตกรรมปลาร้านี้ จึงเป็นการบูรณาการองค์ความรู้แบบข้ามศาสตร์ระหว่างเทคโนโลยีชีวภาพและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ในการส่งเสริมผลิตภัณฑ์อาหารหมักพื้นบ้านโบราณที่สำแดงถึง

ภูมิปัญญาท้องถิ่นและเอกลักษณ์/วัฒนธรรมของคนไทย เพื่อประดิษฐ์เป็นอาหารหมักฟังก์ชันที่มีคุณค่าของโภชนเภสัชให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสากลเป็นที่ยอมรับในวงกว้าง และสนับสนุนเศรษฐกิจของประเทศไทย

อุปกรณ์และวิธีการ

จุลินทรีย์และวัตถุดิบ

กล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์ที่ใช้ในการหมักปลาร้า ได้แก่ *Lactobacillus pentosus* (NSJFR-9) และ *Lactobacillus acidipiscis* (NSJFS-12) ซึ่งแยกและคัดกรองได้จากผลิตภัณฑ์ปลาร้าสับแบบดิบทรงเครื่องครัวทิดเทือง อำเภอเมือง จังหวัดอุทัยธานี และผลิตภัณฑ์ปลาร้าปลาสร้อย อำเภอหนองฉาง จังหวัดอุทัยธานี ตามลำดับ (จีราพร, 2559) ปลาช่อน เกลือสินเธาว์ชนิดเม็ด ข้าวคั่วชนิดผสมข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ซื้อจากตลาดสด เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร แป้งแก่นตะวัน (เยรูซาเล็มอาร์ทิโช้ค) ผลิตโดยศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการหมัก ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (เกศศิณี และคณะ, 2555)

อิทธิพลของความเข้มข้นเกลือต่อการเจริญของแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์

ศึกษาความเข้มข้นเกลือต่อการเจริญของแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์ โดยการขีด (streak) แบคทีเรีย *Lactobacillus pentosus* และ *Lactobacillus acidipiscis* ลงบนอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อแข็งเอ็มอาร์เอส (MRS agar) บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายโอนเชื้อแบคทีเรียจำนวน 1 โคโลนีลงในหลอดทดลองที่มีอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อเหลวเอ็มอาร์เอส (MRS broth) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร บ่มที่สภาวะนิ่ง อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้กล้าเชื้อบริสุทธิ์ของแบคทีเรีย *L. pentosus* และ *L. acidipiscis* ถ่ายโอนกล้าเชื้อบริสุทธิ์ *L. pentosus* และ *L. acidipiscis* ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่มีอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อเหลวเอ็มอาร์เอส ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร (พีเอชเริ่มต้น 6.5) ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0 3 6 และ 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นบ่มที่สภาวะนิ่ง อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน (การทดลองจำนวน 2 ซ้ำ) โดยเก็บตัวอย่างปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ระหว่างการเพาะเลี้ยง เพื่อวิเคราะห์การเจริญของเซลล์ โดยการวัดค่าความขุ่นที่ความยาวคลื่น 562 นาโนเมตร และวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง เพื่อหาความเข้มข้นของเกลือที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์

การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการหมักปลาร้า

ล้างปลาช่อนด้วยน้ำสะอาด แล่เอาเฉพาะเนื้อปลา และบดเนื้อปลาให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น (Daily Collection Blender HR2001/70, Philips, Singapore) เตรียมวัตถุดิบสำหรับการหมักปลาร้าโดยน้ำหนักรวม 50 กรัม ซึ่งประกอบด้วยเนื้อปลาบด เกลือสินเธาว์ ข้าวคั่ว และแป้งแก่นตะวัน ในอัตราส่วนเท่ากับ 86 6 7.2 และ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ใส่ในขวดแก้วแบบมีฝาปิดที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้วขนาด 70 มิลลิลิตร ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปฆ่าเชื้อด้วยความร้อนโดยวิธีการพาสเจอไรซ์ ที่อุณหภูมิ 63 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (Japan External Trade Organization, 2011) สำหรับการทดลองชุดควบคุม (control) เตรียมวัตถุดิบเช่นเดียวกันโดยไม่ผ่านการฆ่าเชื้อโดยวิธีการพาสเจอไรซ์

การหมักปลาร้าโดยใช้กล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์

ศึกษาการหมักปลาร้าโดยใช้กล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์ โดยถ่ายโอนกล้าเชื้อบริสุทธิ์ *L. pentosus* และ *L. acidipiscis* ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่มีอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อเหลวเอ็มอาร์เอส ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร สำหรับกรณีการหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อผสมของแบคทีเรียกรดแล็กติกผสม โดยการถ่ายโอนกล้าเชื้อบริสุทธิ์ *L. pentosus* ปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร และกล้าเชื้อบริสุทธิ์ *L. acidipiscis* ปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่มีอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อเหลวเอ็มอาร์เอส ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร บ่มอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อเหลวที่สภาวะนิ่ง อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแยกตะกอนเซลล์แบคทีเรียกรดแล็กติกออกจากน้ำหมักโดยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ล้างตะกอนเซลล์ด้วยน้ำเกลือ (NaCl) เข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 2 ครั้ง กระจายตะกอนเซลล์ในน้ำกลั่นที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นถ่ายโอนสารแขวนลอยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกลงในวัตถุดิบสำหรับหมักปลาร้า ผสมให้เข้ากัน นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ โดยชุดควบคุมไม่มีการเติมกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติก เก็บตัวอย่างปริมาณ 1.5-2.0 กรัม ในวันที่ 0 3 และ 7 เพื่อใช้วิเคราะห์การเจริญของแบคทีเรียกรดแล็กติกโดยวิธีการเกลี่ยเชื้อบนอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อแข็ง MRS และนับโคโลนี ค่าพีเอชด้วยพีเอชมิเตอร์ ปริมาณกรดแล็กติกด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) (คอลัมน์ Aminex HPX-87H ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นวัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile Phase) ที่มีความเข้มข้น 0.005 โมลาร์ อัตราการไหล 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที สภาวะการวิเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที) การทดสอบเบื้องต้นทางประสาทสัมผัส (sensorial consumer test) ได้แก่ ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส ของผลิตภัณฑ์ปลาร้าทั้ง 4 สูตร เปรียบเทียบกับปลาร้าจากวิธีการหมักแบบพื้นบ้าน โดยมีผู้ทดสอบจำนวน 10 คน และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปลาร้า ได้แก่ ความชื้น ปริมาณไขมัน โปรตีน เยื่อใย เถ้า และคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 2000)

ผลการทดลองและวิจารณ์

อิทธิพลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเจริญของแบคทีเรียกรดแล็กติก

เมื่อเพาะเลี้ยงแบคทีเรียกรดแล็กติก *Lactobacillus pentosus* และ *Lactobacillus acidipiscis* ในหลอดทดลองที่มีอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อเหลวเอ็มอาร์เอส ปริมาตร 5 มิลลิลิตร โดยแปรผันความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0 3 6 และ 9 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) บ่มที่สภาวะนิ่ง อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน แบคทีเรียกรดแล็กติก *L. pentosus* และ *L. acidipiscis* เจริญได้ดีในช่วง 0-24 ชั่วโมง และเข้าสู่ระยะการเจริญคงตัวในช่วง 24-72 ชั่วโมง (Figure 1) สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของการเจริญแบคทีเรียกรดแล็กติกได้ด้วยอัตราการเจริญจำเพาะ (คำนวณด้วยซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Microsoft Excel 2013) และระยะพัก (คำนวณด้วยโปรแกรมออนไลน์ DMFit, http://browser.combase.cc/DMFit.aspx) แบคทีเรียกรดแล็กติก *L. pentosus* มีอัตราการเจริญจำเพาะ (□) สูงสุด 0.093 ต่อชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของเกลือ 0 และ 3 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) และมีอัตราการเจริญจำเพาะลดลงเท่ากับ 0.083 และ 0.064 ต่อชั่วโมง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเกลือเท่ากับ 6 และ 9 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ในขณะที่แบคทีเรียกรดแล็กติก *L. acidipiscis* มีอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด 0.083 ต่อชั่วโมง เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อปราศจากการเติมเกลือ (0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) และมีอัตราการเจริญจำเพาะลดลงเท่ากับ 0.058 0.058 และ 0.052 ต่อชั่วโมง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเกลือสูงขึ้นเท่ากับ 3, 6 และ 9 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระยะพัก (lag time) ของแบคทีเรียกรดแล็กติก *L. pentosus* มีระยะพักน้อย

ที่สุด 1.600 ชั่วโมง (ความเข้มข้นเกลือ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) และมีระยะพักเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.281 3.881 และ 13.355 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเกลือสูงขึ้นเท่ากับ 3, 6 และ 9 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ตามลำดับ โดยการหมักปลาด้วยกล้าเชื้อ *L. acidipiscis* ไม่ปรากฏระยะพักที่ความเข้มข้นเกลือ 0 และ 3 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) แต่ปรากฏระยะพักเพิ่มขึ้น 1.983 และ 2.653 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเกลือเท่ากับ 6 และ 9 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ตามลำดับ ดังนั้น การหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์ จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเกลือ 6 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ซึ่งเป็นปริมาณเกลือที่ต่ำกว่าการหมักปลาร้าทั่วไป สูตรการหมักปลาร้าที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด มักใช้ปริมาณเกลือ 7.3-10 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) (Phithakpol *et al.*, 1995) การใช้เกลือเป็นวิธีการถนอมรักษาอาหารเพื่อป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ปนเปื้อน แต่แบคทีเรียกรดแล็กติกยังคงสามารถเจริญได้ดีในภาวะที่มีเกลือสูง

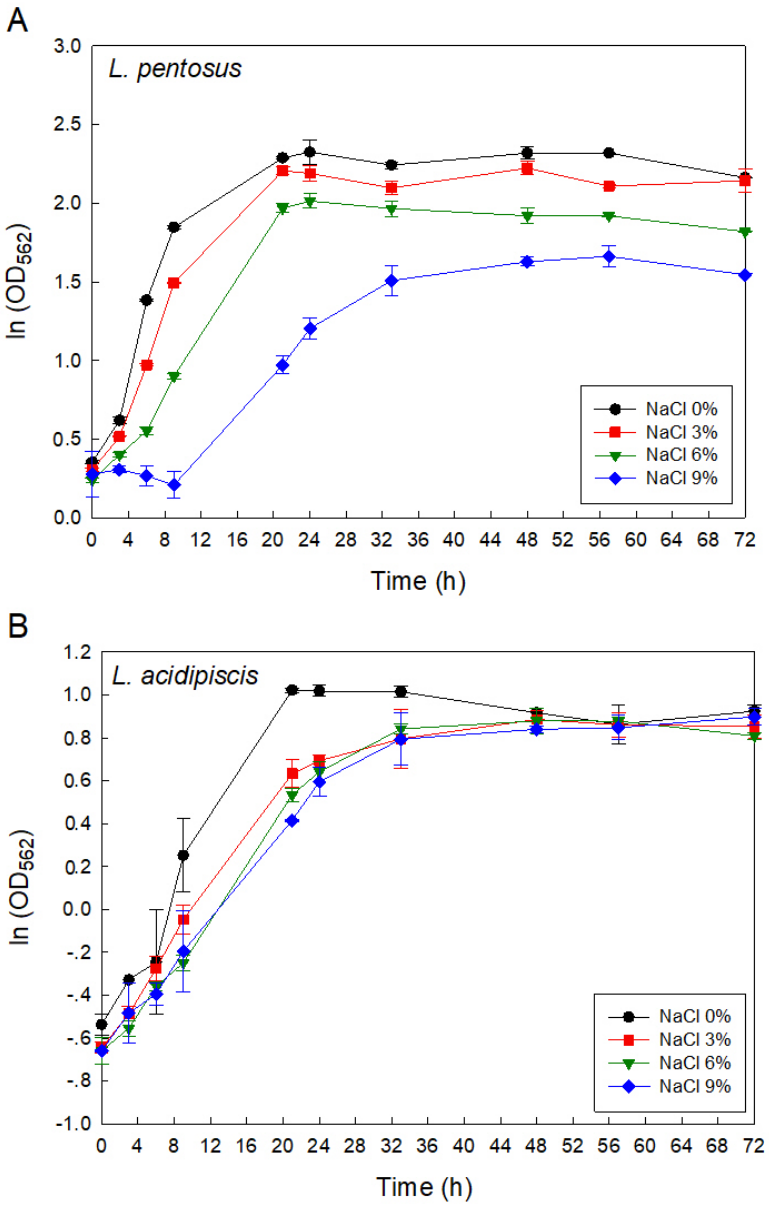


Figure 1 Effect of sodium chloride concentration on bacterial growth, (A) *Lactobacillus pentosus* and (B) *Lactobacillus acidipiscis*, cultured in MRS medium containing 0-9 %w/v of NaCl at 37 °C with an initial pH 6.5 for 72 h. Symbol ●, ■, ▼, ◆ are the cell optical density at 562 nm from bacterial cultures in MRS medium with 0 3 6 and 9 %w/v of NaCl, respectively.

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพและประสาทสัมผัสเบื้องต้นของปลาร้า

การหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อบริสุทธิ์ของแบคทีเรียกรดแล็กติก *L. pentosus* (Lp) *L. acidipiscis* (La) และกล้าเชื้อผสมระหว่าง Lp และ La ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของเกลือเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก) บ่มที่สภาวะนิ่ง ณ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน สรุปลักษณะทางกายภาพระหว่างการหมักและการทดสอบปลาร้าทางประสาทสัมผัสเบื้องต้น (ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส) แสดงดัง Table 1

Table 1 Physical characteristics of fermented fish (Pla-ra) from lactic acid bacteria culture for 7 days.

Characteristics[1]	Fish fermentation (Pla-ra) with pure lactic acid bacteria culture			
	Control[2]	*Lactobacillus pentosus* (Lp)	*Lactobacillus acidipiscis* (La)	Mixed culture (Lp+La)
(a) Fermentation time = 0 day				
appearance of fermented fish				
	agglomerate, natural brown	agglomerate, light brown	agglomerate, light brown	agglomerate, light brown
odor	smell of ground roasted rice	smell of ground roasted rice	smell of ground roasted rice	smell of ground roasted rice
(b) Fermentation time = 3 days				
appearance of fermented fish				
	agglomerate, greenish-brown	agglomerate, light brown	agglomerate, light brown	agglomerate, light brown
odor	smell of rotten meat	smell of ground roasted rice	sour-smelling and ground roasted rice	smell of ground roasted rice
(c) Fermentation time = 7 days				
appearance of fermented fish				
	break into splinters, greenish-brown	break into slurry, light brown	break into slurry, light brown	break into splinters, light brown
odor	smell of rotten meat and salty-smell	smell of salty and ground roasted rice	smell of sour and ground roasted rice	smell of sour and ground roasted rice
flavor[3]	salty, fishy	salty	salty	slightly salty
texture[3]	friable	slightly friable, soft	slightly friable, soft	slightly sticky

[1] The consumer sensory test was primarily conducted with 10 untrained panelists.

[2] Control was the fish fermentation without inoculum of pure lactic acid bacteria.

[3] Fermented fish were cooked by microwave for 30 seconds before testing flavor and texture.

Table 2 Summary of fish fermentation parameters (50 g Pla-ra prepared in 70 mL closed glass jar with pure lactic acid bacteria culture at 37 °C for 7 days).

Lactic acid bacteria culture	Time (day)	Cell concentration (CFU g^{-1})	Specific growth rate[1] (day^{-1})	pH[2]	Lactic acid[3] (%w/w)
Control	0	7.8×10^4		6.58 ± 0.00	0.099 ± 0.000
(without inoculum)	3	7.8×10^8		7.19 ± 0.00	0.000 ± 0.000
	7	4.0×10^8	1.216	6.38 ± 0.00	0.000 ± 0.000
L. pentosus	0	4.8×10^6		6.41 ± 0.32	0.358 ± 0.130
(Lp)	3	3.6×10^7		6.26 ± 0.11	0.366 ± 0.173
	7	2.2×10^8	0.547	5.72 ± 0.18	0.481 ± 0.076
L. acidipiscis	0	6.6×10^6		6.75 ± 0.10	0.312 ± 0.182
(La)	3	3.6×10^7		5.93 ± 0.08	0.479 ± 0.073
	7	2.0×10^8	0.488	5.49 ± 0.06	0.520 ± 0.046
Mixed culture	0	2.4×10^6		6.70 ± 0.06	0.395 ± 0.102
(Lp + La)	3	5.2×10^7		6.09 ± 0.18	0.435 ± 0.075
	7	5.8×10^8	0.787	5.63 ± 0.04	0.602 ± 0.048

[1] The specific growth rate was calculated during 0-7 days according to Sirisansaneeyakul *et al.* (2013).

[2] The suspension of 0.5 g fermented fish prepared in 4.5 mL distilled water for pH measurement with pH meter.

[3] The suspension of 0.5 g fermented fish prepared in 2 mL distilled water for lactic acid determination with HPLC.

การเปลี่ยนแปลงของพีเอช ปริมาณของกรดแล็กติกและแบคทีเรียกรดแล็กติก ระหว่างการหมักปลาร้า แสดงดัง Table 2 ปริมาณของแบคทีเรียกรดแล็กติก Lp, La และกล้าเชื้อผสมระหว่าง Lp และ La เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมัก 7 วัน โดยเพิ่มจากปริมาณเซลล์ 10^6 เป็น 10^8 โคโลนีต่อกรัม โดยการหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อผสมมีอัตราการเจริญจำเพาะสูงที่สุด 0.787 ต่อวัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าพีเอชที่ลดลง เนื่องจากแบคทีเรียกรดแล็กติกผลิตกรดแล็กติกในระหว่างการเจริญ ซึ่งการหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อผสม 7 วัน มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.63 และมีปริมาณกรดแล็กติกสูงที่สุดเท่ากับ 0.602 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนการหมักปลาร้าชุดควบคุม ซึ่งไม่มีการเติมกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกและไม่ผ่านการฆ่าเชื้อโดยวิธีการพาสเจอไรซ์ มีอัตราการเจริญจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ 1.216 ต่อวัน ซึ่งเป็นการเจริญของจุลินทรีย์ปนเปื้อน โดยไม่มีการผลิตกรดแล็กติก ทำให้พีเอชไม่ลดลง

การหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์ สามารถทำให้ลดระยะเวลาของการหมักปลาร้าลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับปลาร้าจากการหมักแบบพื้นบ้าน ซึ่งต้องใช้เวลาการหมักมากกว่า 5 สัปดาห์ โดยผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชและปริมาณกรดแล็กติกของปลาร้าจากการหมักแบบพื้นบ้าน พบว่าปลาร้ามีค่าพีเอช 5.06 และมีปริมาณกรดแล็กติก 1.607 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สอดคล้องกับ Phithakpol *et al*. (1995) ซึ่งรายงานว่าปลาร้าทั่วไปมีพีเอชเท่ากับ 4.1-6.9 และมีปริมาณกรดแล็กติกเท่ากับ 0.5-2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ปลาร้าจากการหมักด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์ 7 วัน มีองค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ดังนี้ โปรตีน 15.70-16.62 ไขมัน 0.23-0.30 เยื่อใย 7.62-14.39 เถ้า 6.40-6.55 และความชื้น 67.13-71.48 โดยไม่มีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรต (Table 3) แสดงว่าแบคทีเรียกรดแล็กติกใช้แหล่งคาร์บอนทั้งหมดในการเจริญระหว่างการหมัก (คาร์โบไฮเดรตเริ่มต้น 2.92-4.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ปลาร้าจากการหมักด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์มีปริมาณสูงของเยื่อใยจากแป้งแก่นตะวัน และมีปริมาณของไขมันต่ำกว่าปลาร้าจากการหมัก

พื้นบ้าน ซึ่งมีองค์ประกอบของเยื่อใย ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต เท่ากับ 0.61 1.38 และ 8.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

Table 3 Chemical composition of fermented fish with pure lactic acid bacteria (50-g fillet in 70-mL closed jar cultured at 37 °C for 7 days) compared with traditional Pla-ra.

Lactic acid bacteria (LAB)	Chemical composition (%w/w)[1]					
	Protein	Lipid	Fiber	Ash	Moisture	Carbohydrate
Control (without LAB)	16.03±0.00 ^{B}	0.07±0.00 ^{B}	4.10±0.00 ^{C}	6.32±0.00 ^{C}	70.48±0.00 ^{A}	3.00±0.00 ^{B}
L. pentosus (Lp)	16.62±1.15 ^{B}	0.30±0.01 ^{B}	14.39±1.24 ^{A}	6.40±0.00 ^{C}	67.13±4.03 ^{A}	0.00±0.00 ^{C}
L. acidipiscis (La)	15.70±0.21 ^{B}	0.23±0.03 ^{B}	7.62±2.23 ^{B}	6.55±0.12 ^{B}	71.48±0.21 ^{A}	0.00±0.00 ^{C}
Mixed culture (Lp + La)	16.19±0.58 ^{B}	0.24±0.02 ^{B}	8.25±0.61 ^{B}	6.44±0.00 ^{B,C}	69.74±0.15 ^{A}	0.00±0.00 ^{C}
Traditional Pla-ra[2]	22.02±0.00 ^{A}	1.38±0.00 ^{A}	0.61±0.00 ^{D}	11.98±0.00 ^{A}	55.79±0.00 ^{B}	8.23±0.00 ^{A}

^{A,B,C,D} Mean values with different superscripts in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

[1] Chemical analyses were performed according to AOAC (2000).

[2] Ready-to-eat product purchased from Jarwirat food (http://www.jawiratfood.com/).

สรุป

การหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์ *L. pentosus*, *L. acidipiscis* และกล้าเชื้อผสมระหว่าง *L. pentosus* และ *L. acidipiscis* โดยใช้ความเข้มข้นเกลือเริ่มต้น 6 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) บ่มที่สภาวะนิ่ง อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ปลาร้าที่ได้จากการหมักด้วยกล้าเชื้อเดี่ยวและกล้าเชื้อผสมมีพีเอชลดลง เนื่องจากการผลิตกรดแล็กติกของแบคทีเรียกรดแล็กติก และการใช้กล้าเชื้อผสมระหว่าง *L. pentosus* และ *L. acidipiscis* ผลิตกรดแล็กติกได้สูงที่สุดเท่ากับ 0.602 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีอัตราการเจริญจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ 0.787 ต่อวัน ซึ่งเหมาะสมกว่ากรณีของการหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อบริสุทธิ์ชนิดเดียว *L. pentosus* และ *L. acidipiscis* การหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกบริสุทธิ์ช่วยกำจัดกลิ่นเหม็นเน่าของปลาร้าที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนได้ และการเติมแป้งแก่นตะวันยังช่วยเพิ่มปริมาณใยอาหารของปลาร้า ทำให้ปรับปรุงคุณค่าทางโภชนเภสัชของอาหารหมักพื้นบ้านของประเทศไทย และกลายเป็นปลาร้าใยอาหารสูงที่มีไขมันและเกลือต่ำได้ สำหรับการพัฒนาการหมักปลาร้าด้วยกล้าเชื้อบริสุทธิ์ในถังหมักกวนขนาดขยายกำลังผลิตเชิงพาณิชย์ จำเป็นต้องทดสอบผลิตภัณฑ์ทางประสาทสัมผัสและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ปลาร้า เพื่อยกระดับคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ปลาร้าเชิงอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร. ติยะภรณ์ เหลืองพิพัฒน์ ภาควิชาชีววิทยาและเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ได้อนุเคราะห์กล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติก และการสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการหมัก ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

เกศศิณี ตระกูลทิวากร กชกร ปรางค์วิเศษ ดารารัตน์ มงคลการ ประภาส ช่างเหล็ก และสาโรจน์ ศิริศันสนียกุล. 2555. **กรรมวิธีการผลิตแป้งเยรูซาเล็มอาร์ทิโช้ค**. เลขที่อนุสิทธิบัตร 8064.

จีราพร ลิลา. 2559. **การแยกและจำแนกแบคทีเรียกรดแล็กติกจากอาหารหมักพื้นบ้าน จังหวัดอุทัยธานี และการผลิตเอนไซม์ดิบ**. รายงานวิจัย การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาตรบัณฑิต สาขาชีววิทยาและเทคโนโลยีชีวภาพ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.

ภณิดา เกื้อสุวรรณ. 2557. **การคัดเลือกโปรไบโอติกแบคทีเรียแลกติกเพื่อใช้ผลิตผักดอง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วันทนีย์ เกรียงสินยศ. 2555. **ลดโซเดียม ยืดชีวิต**. พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์ องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึกในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

อานนต์ ภาคมาลี. 2555. ปลาร้า. **GotoKnow**. แหล่งที่มา: https://www.gotoknow.org/posts/510692, 20 กันยายน 2560.

AOAC. 2000. **Official Method of Analysis of AOAC International**. 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Virginia.

Japan External Trade Organization. 2011. Specifications and Standard for Foods, Food Additives, etc. Under The Food Sanitation Law. April 2011.

Phithakpol, B., W. Varanyanond, S. Reungmaneepaitoon and H. Wood 1995. **The traditional fermented foods of Thailand**, Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok, 157 pp.

Sirisansaneeyakul, S., S. Wannawilai and Y. Chisti. 2013. Repeated fed-batch production of xylitol by *Candida magnoliae* TISTR 5663. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** 88: 1121-1129.

Yang, L., Q.S. He, K. Corscadden, C.C. Udenigwe. 2015. The prospects of Jerusalem artichoke in functional food ingredients and bioenergy production. **Biotechnol. Rep.** 5: 77–88.

ผลของ pH ในกระบวนการทำให้ใสและการเคี่ยวต่อลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไซรัปน้ำตาลมะพร้าว

Effect of pH in Clarification and Evaporation Processes on Quality Attributes of Coconut Sugar Syrup

ธนัชพร ใจตาบ[1*] และ เอกพันธ์ แก้วมณีชัย[1]

Thanatchaporn Jaitab[1*] and Eakaphan Keowmaneechai[1]

บทคัดย่อ

น้ำตาลมะพร้าวสดเป็นผลิตผลที่ได้จากช่อดอกของต้นมะพร้าว สามารถนำมาผลิตเป็นไซรัปได้โดยผ่านกระบวนการตกตะกอนหรือทำให้ใสและการเคี่ยวระเหยน้ำให้เข้มข้น จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงผลกระทบของ pH ในกระบวนการดังกล่าว เพื่อนำไปใช้ในการผลิตไซรัปให้ได้คุณภาพตามต้องการ เมื่อศึกษากระบวนการทำให้ใสโดยปรับ pH ของน้ำตาลมะพร้าวสดในช่วง 3.0 – 9.5 พบว่า pH ที่ 9.5 สามารถตกตะกอนได้มากที่สุด แต่น้ำตาลสดจะมีสีเข้ม จึงเลือกปรับ pH ที่ 9.0 ซึ่งให้ผลการตกตะกอนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อศึกษากระบวนการเคี่ยวโดยปรับ pH ของน้ำตาลมะพร้าวสดที่ทำให้ใสแล้ว ในช่วง 3.5 – 5.5 พบว่า pH ที่ต่ำกว่าส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลซูโครสในไซรัปลดลงเพราะถูกไฮโดรไลซ์กลายเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตสได้มากกว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จึงเพิ่มขึ้นและทำให้ไซรัปเกิดสีเข้มกว่าจากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่มากขึ้น ดังนั้น pH ที่ใช้ในกระบวนการทำให้ใสและกระบวนการเคี่ยวจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อให้ได้ไซรัปที่มีคุณภาพตามต้องการ

ABSTRACT

Coconut sugar is produced from inflorescences of coconut trees. It can be used for syrup production through precipitation or clarification and water evaporation processes. It is necessary to understand the impact of pH in the processes to make coconut sugar syrup with required qualities. The clarification process was studied by adjusting the pH of coconut sap in the range of 3.0 - 9.5. The results showed that the maximum sedimentation was obtained at pH 9.5, which caused a dark coloration. Therefore, pH 9.0 was selected with insignificant difference in sedimentation. The evaporation process was studied by adjusting the pH of clarified coconut sap in the range of 3.5 - 5.5. It was found that lowering pH decreased sucrose in the syrup by higher degree of sucrose hydrolysis into higher contents of glucose and fructose. Thus, this increased reducing sugars caused darker syrup color from higher degree of Maillard reaction. In conclusion, pH in clarification and evaporation processes is an important factor to be controlled to obtain desirable syrup qualities.

Key Words: clarification, coconut sugar, evaporation, pH, syrup

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

[1]ภาคเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

[1]Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000

คำนำ

น้ำตาลมะพร้าวสดเป็นของเหลวที่ได้จากการปาดจั่นหรือช่อดอกของต้นมะพร้าว มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solid, TSS) ประมาณ 15-18 ºBrix โดยมีน้ำตาลซูโครสเป็นองค์ประกอบหลัก น้ำตาลมะพร้าวสดสามารถนำไปทำให้เข้มข้นขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ไซรัปน้ำตาลมะพร้าวที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ประมาณ 70-80 ºBrix มีกลิ่นรสเฉพาะตัว นำไปใช้เป็นเครื่องปรุงรสได้ทั้งในอาหารคาวและอาหารหวาน มีความคงตัวต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และมีอายุการเก็บรักษายาวนานขึ้น

แม้ว่าปัจจุบันจะมีการผลิตไซรัปน้ำตาลมะพร้าวเชิงพาณิชย์แล้ว แต่ผู้ผลิตมักประสบปัญหาคุณภาพของไซรัป เช่น สี ความขุ่น ความหนืด กลิ่นรส และองค์ประกอบทางเคมี มีความแปรปรวนไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับคุณภาพเริ่มต้นของน้ำตาลมะพร้าวสดและสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะกระบวนการตกตะกอนหรือทำให้ใส (clarification) และกระบวนการเคี่ยวระเหยน้ำให้เข้มข้น (evaporation) องค์ความรู้เกี่ยวกับวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไซรัปน้ำตาลมะพร้าวยังมีอยู่น้อยมาก ทำให้ผู้ผลิตไม่สามารถทำการผลิตไซรัปน้ำตาลมะพร้าวให้มีคุณภาพตามที่ต้องการได้ เช่น ไซรัปขุ่น มีสีเข้มเกินไป เกิดการตกตะกอน การตกผลึก และการเปลี่ยนสีอย่างรวดเร็วในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับ เป็นต้น

สีและความขุ่นของไซรัปเป็นคุณลักษณะที่สำคัญในการตัดสินใจการยอมรับของผู้บริโภค Laksameethanasana *et al.* (2012) ได้ศึกษากระบวนการทำให้ใสในน้ำอ้อย โดยวิธีการ liming process ด้วยการใช้สารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดตะกอนอนุภาคคอลลอยด์ตาม pH ที่เหมาะสม เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Prati and Moretti (2010) และการศึกษาของ วรรณพร (2558) ซึ่งได้ทำการศึกษาการตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำอ้อยด้วยสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์เช่นเดียวกัน

การเติมกรดอินทรีย์ในน้ำตาลมะพร้าวสด ส่งผลให้น้ำตาลมะพร้าวสดมีค่า pH ลดลง และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยการเคี่ยว จึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขึ้น น้ำตาลซูโครสจะถูกย่อยกลายเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตส ซึ่งน้ำตาลสองชนิดนี้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ทำให้สามารถป้องกันการตกผลึกของไซรัปได้ ดังงานวิจัยของ Roukas and Kotzekidou (1997) ซึ่งได้ทำการศึกษา pretreatment เพื่อเพิ่มความเป็นกรดซิตริกในไซรัปอินทผาลัม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของ pH ในกระบวนการทำให้ใสและกระบวนการเคี่ยวต่อลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไซรัปน้ำตาลมะพร้าวที่ได้ เนื่องจาก pH ในกระบวนการทั้งสองน่าจะเป็นปัจจัยสำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของไซรัปน้ำตาลมะพร้าว เช่น ส่งผลต่อการละลายและตกตะกอนของอนุภาคพอลิแซคคาไรด์และโปรตีนที่อยู่ในน้ำตาลมะพร้าวสด ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของน้ำตาลซูโครสเกิดเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่ความเข้มสีและสารให้กลิ่นรส เป็นต้น

อุปกรณ์และวิธีการ

ผลของ pH ในกระบวนการทำให้ใสต่อคุณภาพน้ำตาลมะพร้าวสด

นำน้ำตาลมะพร้าวสดจากจังหวัด สมุทรสงคราม มาแบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกนำมาปรับ pH ด้วย citric acid ให้มีค่า pH 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 ส่วนที่สองนำมาปรับ pH ด้วย $Ca(OH)_2$ ให้มีค่า pH 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0 และ 9.5 ส่วนที่สามนำมาปรับ pH ด้วย NaOH ให้มีค่า pH เช่นเดียวกับของ $Ca(OH)_2$

เปรียบเทียบกับน้ำตาลมะพร้าวสดที่ไม่ปรับ pH จากนั้นปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 5-10 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนกับส่วนใส ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยนำไปวิเคราะห์ทางกายภาพ ดังนี้

1. ปริมาณตะกอนต่อน้ำหนักน้ำตาลมะพร้าวสด โดยการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge ที่ความเร็ว 5,000 rpm นาน 5 นาที แล้วชั่งน้ำหนักตะกอน

2. ความขุ่นของส่วนใสหลังแยกตะกอน โดยการวัดค่าการส่องผ่านแสง ที่ความยาวคลื่น 625 nm ด้วยเครื่อง spectrophotometer

3. ค่าสี (L* a* และ b*) ของส่วนใสหลังแยกตะกอน ด้วยเครื่อง tintometer (Lovibond, UK)

ผลของ pH ในกระบวนการเคี่ยวระเหยน้ำต่อคุณภาพไซรัปน้ำตาลมะพร้าว

นำน้ำตาลมะพร้าวสดปริมาณ 3,500 กรัมต่อตัวอย่างมาเติม $Ca(OH)_2$ ให้มี pH 9.0 ซึ่งเป็น pH ที่เหมาะสมจากผลการทดลองในกระบวนการทำให้ใส แล้วปล่อยให้ตกตะกอนประมาณ 5-10 นาที จากนั้นนำไปกรองเพื่อแยกส่วนใสด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 เมื่อกรองเสร็จแล้ว นำส่วนใสไปปรับ pH ด้วย citric acid ให้มี pH 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 และ 5.5 ในขั้นตอนนี้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid hydrolysis) ของน้ำตาลซูโครส ซึ่งจะช่วยป้องกันการตกผลึกในผลิตภัณฑ์ไซรัป จากนั้นนำไปเคี่ยวด้วยกระทะไฟฟ้าที่ตั้งปุ่มปรับระดับอุณหภูมิไว้ที่ 120 องศาเซลเซียส แล้วใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำตาลตลอดการเคี่ยว เมื่อน้ำตาลมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 104 องศาเซลเซียส จึงเติม $Ca(OH)_2$ ปรับ pH ของน้ำตาลให้เป็น 5.5 เพื่อปรับรสชาติของไซรัปให้มีความเปรี้ยวลดลง จากนั้นเคี่ยวต่อจนน้ำตาลมีอุณหภูมิ 107 องศาเซลเซียส จึงหยุดให้ความร้อนแล้วรีบนำไปบรรจุขวดแก้วและปิดฝา ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยนำไซรัปที่ได้ไปวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพ ดังนี้

1. pH ด้วยเครื่อง pH meter

2. ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ (titratable acidity, TA)

3. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solids, TSS) ด้วยเครื่อง refractometer

4. ความหนืด ด้วยเครื่อง viscometer หัวเข็ม LV-3 ความเร็วรอบ 90 rpm

5. ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ด้วยวิธี Lane and Eynon ตามวิธีของ AOAC (2000)

6. ค่า water activity ด้วยเครื่อง water activitymeter ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

7. ความขุ่นของไซรัป โดยการวัดค่าการส่องผ่านแสง ที่ความยาวคลื่น 625 nm ด้วยเครื่อง spectrophotometer

8. ปริมาณน้ำตาลซูโครส ฟรุคโตส และซูโครส วิเคราะห์ด้วย sucrose, D-fructose และ D-glucose assay procedure (Megazyme, Ireland)

9. ค่าสี (L* a* และ b*) ด้วยเครื่อง tintometer (Lovibond, UK)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของ pH ในกระบวนการทำให้ใสต่อคุณภาพน้ำตาลมะพร้าวสด

จากการศึกษาผลของ pH ในกระบวนการทำให้ใสต่อคุณภาพน้ำตาลมะพร้าวสดโดยใช้สารทั้ง 3 ชนิดเปรียบเทียบกันได้แก่ citric acid, $Ca(OH)_2$ และ NaOH เพื่อศึกษาว่าสารชนิดใดจะสามารถตกตะกอนอนุภาค

คอลลอยด์ในน้ำตาลมะพร้าวได้ดี และดีที่สุดที่ pH ใด เมื่อนำน้ำตาลมะพร้าวสดปรับ pH ด้วย citric acid ที่ pH 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 พบว่า ที่ pH 3.0 สามารถตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์ได้ดี และมีความขุ่นของส่วนใสน้อย (Table 1) เนื่องจากตะกอนถูกแยกออกไปแล้ว (Walford, 2002) แต่ pH ไม่ส่งผลต่อค่าสี เนื่องจากค่าสีของ pH ที่ต่างกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Table 1 Effect of clarification pH adjusted by citric acid on properties of coconut sap

pH of coconut sap	Sediment (%)	Turbidity after clarification	Color value		
			L*	a*	b*
control	0.78 ± 0.08[b]	0.079 ± 0.01[a]	58.6 ± 0.95[a]	1.4 ± 0.12[a]	7.2 ± 1.10[a]
3.0	0.83 ± 0.17[b]	0.070 ± 0.02[a]	58.8 ± 0.92[a]	1.3 ± 0.10[a]	6.1 ± 1.28[a]
3.5	0.86 ± 0.20[b]	0.099 ± 0.02[a]	58.7 ± 0.90[a]	1.2 ± 0.06[a]	6.7 ± 1.23[a]
4.0	0.92 ± 0.18[b]	0.092 ± 0.00[a]	58.6 ± 0.64[a]	1.3 ± 0.00[a]	7.0 ± 1.22[a]
4.5	1.03 ± 0.14[ab]	0.075 ± 0.02[a]	58.5 ± 0.87[a]	1.3 ± 0.12[a]	6.7 ± 1.08[a]
5.0	1.26 ± 0.24[a]	0.101 ± 0.01[a]	58.2 ± 0.93[a]	1.3 ± 0.10[a]	7.4 ± 1.08[a]

[a, b, c...] Means followed by a same letter of vertical are not significantly difference at the 5%.

เมื่อนำน้ำตาลมะพร้าวสดมาปรับ pH ด้วย $Ca(OH)_2$ และ NaOH ที่ pH 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0 และ 9.5 พบว่าการตกตะกอนโดยใช้สาร $Ca(OH)_2$ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนได้มากกว่าการใช้สาร NaOH และตกตะกอนได้มากที่สุดที่ pH 9.5 โดยมีร้อยละของตะกอนที่ 2.39 (Table 2) เนื่องจากองค์ประกอบในน้ำตาลมะพร้าวสดเกิดการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมจาก $Ca(OH)_2$ ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคอลลอยด์และเกิดการตกตะกอนลงมา (Thai and Doherty, 2012) และที่ $Ca(OH)_2$ pH 9.5 พบว่ามีค่าความเป็นสีเหลืองมากที่สุด (Table 3) แสดงว่ามีสีเหลืองเข้มที่สุด จึงเลือกปรับน้ำตาลมะพร้าวสดโดยใช้ $Ca(OH)_2$ ที่ pH 9.0 นำไปศึกษาต่อในหัวข้อผลของ pH ในกระบวนการเคี่ยวระเหยน้ำต่อคุณภาพไซรัปน้ำตาลมะพร้าว เนื่องจากการปรับน้ำตาลมะพร้าวสดด้วย $Ca(OH)_2$ ที่ pH 9.0 มีร้อยละของตะกอนเท่ากับ 2.18 (Table 2) ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับที่ pH 9.5 นอกจากนี้ยังให้สีเหลืองอ่อนกว่า (Table 3) เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปเคี่ยวเป็นไซรัปมากกว่า

Table 2 Effect of clarification pH adjusted by $Ca(OH)_2$ and NaOH on sediment and turbidity of coconut sap

pH of coconut sap	Sediment (%)		Turbidity after clarification	
	$Ca(OH)_2$	NaOH	$Ca(OH)_2$	NaOH
control	$0.94 \pm 0.05^{de, A}$	$0.92 \pm 0.25^{a, A}$	$0.054 \pm 0.03^{ab, A}$	$0.035 \pm 0.01^{a, A}$
6.0	$0.83 \pm 0.03^{e, A}$	$0.82 \pm 0.22^{a, A}$	$0.041 \pm 0.01^{ab, A}$	$0.029 \pm 0.00^{a, A}$
6.5	$1.12 \pm 0.18^{cd, A}$	$0.98 \pm 0.08^{a, A}$	$0.064 \pm 0.03^{a, A}$	$0.030 \pm 0.01^{a, A}$
7.0	$1.34 \pm 0.31^{bc, A}$	$0.81 \pm 0.13^{a, A}$	$0.037 \pm 0.01^{ab, A}$	$0.019 \pm 0.00^{b, A}$
7.5	$1.14 \pm 0.10^{cd, A}$	$1.07 \pm 0.17^{a, A}$	$0.033 \pm 0.02^{ab, A}$	$0.018 \pm 0.00^{b, A}$
8.0	$1.12 \pm 0.11^{cd, A}$	$0.94 \pm 0.16^{a, A}$	$0.034 \pm 0.02^{ab, A}$	$0.021 \pm 0.00^{b, A}$
8.5	$1.56 \pm 0.08^{b, A}$	$1.05 \pm 0.17^{a, A}$	$0.029 \pm 0.01^{b, A}$	$0.021 \pm 0.00^{b, A}$
9.0	$2.18 \pm 0.09^{a, A}$	$0.95 \pm 0.20^{a, B}$	$0.027 \pm 0.00^{b, A}$	$0.021 \pm 0.00^{b, B}$
9.5	$2.39 \pm 0.18^{a, A}$	$0.98 \pm 0.07^{a, B}$	$0.023 \pm 0.00^{b, A}$	$0.022 \pm 0.00^{b, A}$

$^{a, b, c...}$ Means followed by a same letter of vertical are not significantly difference at the 5%.

$^{A, B, C...}$ Means followed by a same letter of horizontal are not significantly difference at the 5%.

Table 3 Effect of clarification pH adjusted by $Ca(OH)_2$ and NaOH on color value of coconut sap

pH of coconut sap	Color value					
	L*		a*		b*	
	$Ca(OH)_2$	NaOH	$Ca(OH)_2$	NaOH	$Ca(OH)_2$	NaOH
control	$59.7 \pm 0.25^{a, A}$	$59.2 \pm 0.15^{a, B}$	$1.0 \pm 0.10^{a, B}$	$1.3 \pm 0.06^{a, A}$	$7.1 \pm 0.57^{de, A}$	$7.0 \pm 0.10^{e, A}$
6.0	$59.6 \pm 0.15^{a, A}$	$59.3 \pm 0.06^{a, B}$	$1.0 \pm 0.10^{a, A}$	$1.2 \pm 0.06^{ab, A}$	$6.8 \pm 0.53^{e, A}$	$6.9 \pm 0.26^{e, A}$
6.5	$58.8 \pm 0.93^{b, A}$	$59.3 \pm 0.12^{a, A}$	$1.0 \pm 0.06^{a, B}$	$1.3 \pm 0.06^{a, A}$	$7.3 \pm 1.36^{de, A}$	$7.0 \pm 0.15^{e, A}$
7.0	$59.6 \pm 0.10^{a, A}$	$59.4 \pm 0.21^{a, A}$	$0.9 \pm 0.12^{ab, A}$	$1.1 \pm 0.10^{c, A}$	$6.8 \pm 0.49^{e, A}$	$7.0 \pm 0.20^{e, A}$
7.5	$59.4 \pm 0.62^{ab, A}$	$59.1 \pm 0.00^{a, A}$	$0.8 \pm 0.12^{b, B}$	$1.1 \pm 0.00^{c, A}$	$7.2 \pm 0.21d^{e, A}$	$7.1 \pm 0.31^{e, A}$
8.0	$59.6 \pm 0.12^{a, A}$	$59.0 \pm 0.10^{a, B}$	$0.8 \pm 0.15^{b, B}$	$1.1 \pm 0.06^{bc, A}$	$7.9 \pm 0.29^{cd, A}$	$7.8 \pm 0.20^{d, A}$
8.5	$59.8 \pm 0.06^{a, A}$	$59.0 \pm 0.12^{a, B}$	$0.6 \pm 0.06^{c, B}$	$0.9 \pm 0.06^{d, A}$	$8.5 \pm 0.15^{c, B}$	$9.7 \pm 0.36^{c, A}$
9.0	$59.7 \pm 0.10^{a, A}$	$58.4 \pm 0.60^{b, A}$	$0.3 \pm 0.12^{d, A}$	$0.6 \pm 0.12^{e, A}$	10.6 ± 0.31^{bB}	$12.1 \pm 0.42^{b, A}$
9.5	$59.7 \pm 0.10^{a, A}$	$57.8 \pm 0.21^{c, B}$	$0.1 \pm 0.10^{e, B}$	$0.6 \pm 0.06^{e, A}$	$13.2 \pm 0.12^{a,B}$	$15.1 \pm 0.64^{a, A}$

$^{a, b, c...}$ Means followed by a same letter of vertical are not significantly difference at the 5%.

$^{A, B, C...}$ Means followed by a same letter of horizontal are not significantly difference at the 5%.

ผลของ pH ในกระบวนการเคี่ยวระเหยน้ำต่อคุณภาพไซรัปน้ำตาลมะพร้าว

จากการศึกษาผลของ pH ในกระบวนการทำให้ใสต่อคุณภาพน้ำตาลมะพร้าวสด พบว่า pH ของน้ำตาลมะพร้าวสดที่ต่างกัน มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกัน จึงนำผลดังกล่าวมาทำการศึกษาผลของ pH ในกระบวนการเคี่ยวระเหยน้ำต่อคุณภาพไซรัปน้ำตาลมะพร้าวต่อไป เพื่อศึกษาว่า pH ของน้ำตาล

มะพร้าวสดก่อนเคี่ยวจะมีผลต่อคุณภาพไซรัปน้ำตาลมะพร้าวอย่างไร โดยเมื่อปรับ pH ด้วย $Ca(OH)_2$ ที่ 9.0 แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนออก นำส่วนใสไปปรับ pH ด้วย citric acid ให้มี pH 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 และ 5.5 เพื่อศึกษาผลของ pH ในกระบวนการเคี่ยวระเหยน้ำต่อคุณภาพของไซรัป แล้วนำไปปรับ pH ด้วย $Ca(OH)_2$ ให้ได้ pH ประมาณ 5.5 อีกครั้งหนึ่ง ผลการศึกษาพบว่า pH 3.5 จะมีปริมาณกรดทั้งหมดมากที่สุด และเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ปริมาณกรดทั้งหมดจะลดลงตามลำดับ (Table 4) ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณ citric acid ที่เติมลงไปในน้ำตาลมะพร้าวสดก่อนเคี่ยว นอกจากนี้ pH มีผลต่อค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและความหนืด โดยเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและความหนืดจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ (Table 4) เนื่องจากเมื่อเติม citric acid ลงไปในน้ำตาลมะพร้าวสดก่อนเคี่ยว กรดจะไปไฮโดรไลซ์อนุภาคบางส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ให้ขาดออกจากกันมีผลทำให้ความหนืดลดลง และกรดยังไปไฮโดรไลซ์ซูโครสบางส่วนทำให้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ลดลงด้วย

Table 4 Effect of initial evaporation pH on final pH, titratable acidity, total soluble solids and viscosity of coconut sugar syrup

pH of coconut sap after adding citric acid	pH of syrup after adding $Ca(OH)_2$	Titratable acidity (%TA)	TSS (ºBrix)	Viscosity (cP)
Control	5.50 ± 0.18[a]	0.18 ± 0.01[a]	72.2 ± 0.55[a]	666.5 ± 4.82[c]
3.5	5.52 ± 0.08[a]	0.18 ± 0.02[ab]	68.6 ± 0.75[c]	167.6 ± 2.07[f]
4.0	5.51 ± 0.07[a]	0.16 ± 0.02[bc]	69.9 ± 0.06[b]	319.6 ± 4.05[e]
4.5	5.54 ± 0.04[a]	0.15 ± 0.01[cd]	71.6 ± 1.06[a]	648.3 ± 6.03[d]
5.0	5.61 ± 0.05[a]	0.14 ± 0.01[d]	71.8 ± 0.67[a]	722.1 ± 2.59[b]
5.5	5.48 ± 0.05[a]	0.14 ± 0.01[cd]	72.2 ± 0.62[a]	1033.6 ± 0.72[a]

[a, b, c...] Means followed by a same letter of vertical are not significantly difference at the 5%.

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์พบว่า pH มีผลต่อกระบวนการเคี่ยวระเหยน้ำต่อคุณภาพไซรัปน้ำตาลมะพร้าว โดยเมื่อปรับ pH ของน้ำตาลมะพร้าวสดก่อนเคี่ยวเป็นกรดมากขึ้น จะทำให้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นด้วย สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์น้ำตาลสามชนิดแยกกันได้แก่ กลูโคส ซูโครส และฟรุคโตส พบว่าเมื่อปรับ pH ของน้ำตาลมะพร้าวสดเป็นกรดมากขึ้นจะมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตสเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่เมื่อปรับ pH เป็นกรดมากขึ้นจะมีปริมาณน้ำตาลซูโครสลดลง (Table 5,6) ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเติมกรดลงไป กรดจะไปไฮโดรไลซ์น้ำตาลซูโครส เกิดเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตส ซึ่งน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตสเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ส่งผลให้น้ำตาลซูโครสที่เป็นสาเหตุของการตกผลึกน้อยลง ในส่วนของค่า water activity พบว่า ที่ pH ต่างกัน ค่า water activity ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Table 5) เนื่องจากมีการเติม $Ca(OH)_2$ อีกครั้งในขณะเคี่ยวไซรัปเพื่อปรับ pH เป็น 5.5 ให้ผลิตภัณฑ์ไซรัปสุดท้ายที่ได้มีรสชาติไม่แปลกไปจาก

เดิม หรือไม่เกิดรสเปรี้ยว การเติม $Ca(OH)_2$ จึงอาจทำให้เกิดการตกตะกอนอีกครั้งหนึ่ง แต่การเติม $Ca(OH)_2$ ในครั้งนี้พบว่า ความขุ่นของไซรัปไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Table 5)

Table 5 Effect of initial evaporation pH on reducing sugars, water activity and turbidity of coconut sugar syrup

pH of coconut sap after adding citric acid	Reducing sugars (g/100 ml)	Water activity (a_w)	Turbidity of syrup
Control	5.24 ± 0.44[d]	0.7385 ± 0.02[a]	0.162 ± 0.01[a]
3.5	34.50 ± 1.77[a]	0.7479 ± 0.01[a]	0.177 ± 0.06[a]
4.0	18.02 ± 1.54[b]	0.7465 ± 0.02[a]	0.148 ± 0.03[a]
4.5	9.03 ± 0.48[c]	0.7417 ± 0.01[a]	0.137 ± 0.01[a]
5.0	5.01 ± 0.09[d]	0.7486 ± 0.01[a]	0.131 ± 0.00[a]
5.5	4.98 ± 0.52[d]	0.7452 ± 0.01[a]	0.151 ± 0.00[a]

[a, b, c...] Means followed by a same letter of vertical are not significantly difference at the 5%.

จากผลการวิเคราะห์ค่าสีของไซรัปน้ำตาลมะพร้าวซึ่ง L* คือค่าความสว่างของไซรัป a* คือค่าความเป็นสีแดง b* คือค่าความเป็นสีเหลือง พบว่า pH น้ำตาลมะพร้าวสดก่อนเคี่ยวมีผลต่อค่าสี เมื่อ pH ลดลงส่งผลให้ค่าความสว่างลดลง ค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองมากขึ้น (Table 6) เนื่องมาจากเมื่อเติมกรดลงไป กรดจะไปไฮโดรไลซ์น้ำตาลซูโครส เกิดเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตสซึ่งเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อนำน้ำตาลมะพร้าวสดไปเคี่ยวให้ความร้อน น้ำตาลรีดิวซ์เหล่านี้จะเป็นสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ไซรัปที่มีความเป็นกรดมาก จะมีสีเข้มมากที่สุด

Table 6 Effect of initial evaporation pH on sugars and color value of coconut sugar syrup

pH of coconut sap after adding citric acid	Sugars			Color value		
	D-Glucose (g/100 ml)	D-Fructose (g/100 ml)	Sucrose (g/100 ml)	L*	a*	b*
Control	3.54 ± 0.07[d]	3.40 ± 0.14[d]	65.40 ± 0.95[b]	41.0 ± 0.87[a]	16.4 ± 0.96[c]	55.7 ± 1.05[a]
3.5	24.72 ± 1.84[a]	23.86 ± 1.91[a]	22.95 ± 1.19[d]	31.5 ± 4.36[b]	23.5 ± 2.46[a]	48.6 ± 6.23[b]
4.0	13.23 ± 0.78[b]	13.17 ± 0.61[b]	49.18 ± 0.46[c]	36.4 ± 1.61[a]	20.9 ± 1.14[ab]	53.4 ± 2.35[ab]
4.5	6.15 ± 0.28[c]	6.20 ± 0.37[c]	63.52 ± 2.63[b]	38.5 ± 2.43[a]	18.5 ± 1.65[bc]	53.9 ± 2.05[ab]
5.0	3.50 ± 0.13[d]	3.53 ± 0.14[d]	70.47 ± 3.44[a]	37.6 ± 3.03[a]	18.3 ± 1.70[bc]	52.9 ± 2.00[ab]
5.5	3.53 ± 0.38[d]	3.49 ± 0.22[d]	71.08 ± 3.13[a]	36.7 ± 0.53[a]	17.8 ± 1.74[bc]	51.2 ± 2.90[ab]

[a, b, c...] Means followed by a same letter of vertical are not significantly difference at the 5%.

สรุป

กระบวนการตกตะกอนหรือทำให้ใสและการเคี่ยวระเหยน้ำให้เข้มข้น เป็นส่วนหนึ่งของการผลิตไซรัปน้ำตาลมะพร้าว เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไซรัปน้ำตาลมะพร้าวที่มีคุณภาพดี และตรงกับความต้องการของผู้บริโภค การศึกษาผลของ pH จึงมีความสำคัญต่องานวิจัยนี้ เนื่องมาจาก pH ที่แตกต่างกันส่งผลให้น้ำตาลมะพร้าวสดก่อนเคี่ยวตกตะกอนได้ต่างกัน โดยการใช้สารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ปรับ pH ที่ 9.0 ทำให้ตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์และโปรตีนได้มากที่สุด นอกจากนี้ pH ยังมีผลต่อคุณภาพของไซรัป โดยเมื่อปรับ pH ด้วยกรดซิตริกที่ pH ต่างกัน น้ำตาลมะพร้าวสดที่มีความเป็นกรดมาก จะเกิดการไฮโดรไลซ์ของน้ำตาลมาก ปริมาณน้ำตาลซูโครสลดลง ไซรัปจะตกผลึกได้ยากขึ้น การไฮโดรไลซ์ของซูโครสส่งผลให้เกิดน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งเมื่อนำน้ำตาลมะพร้าวสดไปเคี่ยวให้ความร้อน น้ำตาลรีดิวซ์นี้จะทำให้เกิดสีน้ำตาลเข้มขึ้น ไซรัปมีสีเข้มขึ้น ดังนั้น pH จึงมีบทบาทสำคัญในเรื่องของกระบวนการทำให้ใสและการเคี่ยวระเหยน้ำต่อคุณภาพของไซรัปน้ำตาลมะพร้าว เราจึงต้องเลือก pH ในแต่ละกระบวนการให้เหมาะสมกับคุณภาพไซรัปที่ต้องการ

เอกสารอ้างอิง

วรรณพร พันธนียะ. 2558. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไซรัปน้ำอ้อยจากน้ำอ้อยคั้นน้ำสุพรรณบุรี 50**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

Laksameethanasana, P., N. Somla, S. Janprem and N. Phochuen 2012. Clarification of sugarcane juice for syrup production. **Procedia Engineering** 32: 141-147.

Prati, P. and R. H. Moretti 2010. Study of clarification process of sugar cane juice for consumption. **Food Science and Technology (Campinas)** 30(3): 776-783.

Roukas, T. and P. Kotzekidou 1997. Pretreatment of date syrup to increase citric acid production. **Enzyme and Microbial Technology** 21: 273-276.

Thai, C. C. and W. O. Doherty 2012. Characterisation of sugarcane juice particles that influence the clarification process. **In Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists** 34.

Walford, S. N. 2002. Applications of ion chromatography in cane sugar research and process problems. **Journal of Chromatography A** 956(1): 187-199.

สมบัติบางประการของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้าที่ได้รับความนิยมในประเทศไทย

Some Properties of Popular Commercial Instant Noodle in Thailand

สุพรัตน์ สุธีเวช[1*] ปิยะฉัตร ใจเอื้อ[1] และ ดวงใจ ถิรธรรมถาวร[1]

Suparut Sutheeves[1*], Piyachat Chai-uea[1] and Doungjai Thirathumthavorn[1]

บทคัดย่อ

บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ โดยมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพแตกต่างกัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้าที่มีส่วนแบ่งทางการตลาด 4 ลำดับแรกในประเทศไทย โดยมีการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความข้นหนืด คุณภาพการหุงต้ม และลักษณะเนื้อสัมผัส ผลการวิจัย พบว่า บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทั้ง 4 ยี่ห้อมีปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีนและปริมาณไขมันร้อยละ 2.00-5.87, 8.59-9.57 และ 17.29-19.23 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีเวลาที่เหมาะสมในการต้มให้สุกอยู่ในช่วง 3.00-3.10 นาที ลักษณะเนื้อสัมผัสของบะหมี่หลังต้มสุก มีความสัมพันธ์กับปริมาณโปรตีน พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความข้นหนืด และคุณภาพการหุงต้ม โดยบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปที่มีค่า hardness, gumminess และ chewiness ต่ำ จะมีปริมาณโปรตีนต่ำและน้ำหนักที่ได้หลังการต้มสูง ส่วนค่า adhesiveness ของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกับค่าความหนืดสูงสุด ค่า breakdown และปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม

ABSTRACT

Instant noodle is a popular food consumed in many countries. Anyway, the physical and chemical properties of commercial instant noodle are different. The objective of this study was to investigate the properties of commercial instant noodles holding the top four market share in Thailand. The samples were analyzed for proximate composition, pasting properties, cooking qualities and texture analysis. The results showed that moisture, protein and fat contents of all instant noodles were in the range of 2.00-5.87, 8.59-9.57 and 17.29-19.23% (dry weight basis), respectively. The optimum cooking time was the range of 3.00-3.10 minutes. The textural characteristics were related to protein contents, pasting properties and cooking qualities. Instant noodles containing low protein content showed the low values of hardness, gumminess and chewiness and exhibited higher cooking yield. The adhesiveness of instant noodle was positively correlated with peak viscosity, breakdown and cooking loss.

Key Words: instant noodle, proximate composition, texture, cooking qualities, pasting properties

*Corresponding author; e-mail address: Civet_paakok@hotmail.com

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

[1]Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000

คำนำ

บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายไปทั่วโลกโดยเฉพาะในกลุ่มผู้บริโภคที่อยู่ในทวีปเอเชีย เนื่องจากบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปที่ขายทั่วไปตามท้องตลาดจะมีการเติมสารอาหารที่เป็นประโยชน์เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ มีหลากหลายรสชาติ สะดวกรวดเร็วในการบริโภค มีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลานาน และมีราคาที่เหมาะสม จึงทำให้บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปมีการบริโภคมากกว่า 80 ประเทศทั่วโลกและได้กลายเป็นอาหารที่ผู้บริโภคยอมรับในระดับสากล (Guita *et al*., 2014) ทั้งนี้ปริมาณความต้องการในการบริโภคบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทั่วโลกในปี 2559 มีปริมาณความต้องการบริโภคบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป 97,460 ล้านหน่วย และประเทศที่มีความต้องการบริโภคบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปมากที่สุด คือ จีนและฮ่องกง รองลงมาคือ อินโดนีเซีย ญี่ปุ่น เวียดนาม อินเดีย สหรัฐอเมริกา เกาหลีใต้ ฟิลิปปินส์ และประเทศไทย ซึ่งอยู่ในอันดับที่ 9 (World Instant Noodle Association, 2017) ปัจจุบันตลาดบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปของประเทศไทยมีมูลค่ารวมประมาณ 14,576 ล้านบาท โดยทั่วไปบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้ายี่ห้อต่างๆ มีวัตถุดิบหลักที่สำคัญ คือ แป้งสาลี น้ำ เกลือ น้ำมันพืช และ/หรือ ด่าง ซึ่งบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้ายี่ห้อต่างๆ จะใช้วัตถุดิบหรือส่วนผสมและกรรมวิธีในการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปที่ได้มีคุณภาพ ลักษณะเนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่นรสและสีแตกต่างกันไป Park and Baik (2004) ได้ศึกษาปริมาณโปรตีนของแป้งสาลีต่อคุณภาพของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป พบว่า การใช้แป้งสาลีที่มีปริมาณโปรตีนสูง (> 13.6%) บะหมี่จะมีค่า L* เพิ่มขึ้น ค่าการดูดซับน้ำมันและค่า b* ลดลง และความยืดหยุ่นของเส้นมากกว่าบะหมี่ที่มีการใช้แป้งสาลีปริมาณโปรตีนต่ำ (< 12.2%) นอกจากนี้ Choy *et al*. (2012) ได้ศึกษาคุณภาพของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปจากแป้งสาลีชนิดโปรตีนต่ำ (8.80%) ที่ผสม acetylate potato starch (APS) พบว่า การผสม APS ช่วยเพิ่มค่า hardness และลดค่า adhesiveness แต่ไม่มีผลต่อค่า cohesiveness และเมื่อใช้ APS 10% ของน้ำหนักแป้งจะลดการดูดซับน้ำมันได้มากที่สุด จะเห็นว่าปริมาณโปรตีนและการใช้ส่วนผสมต่างๆ มีผลต่อคุณภาพของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้า ได้แก่ องค์ประกอบโดยประมาณ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความข้นหนืด คุณภาพการหุงต้ม และลักษณะเนื้อสัมผัส โดยข้อมูลจากงานวิจัยนี้อาจใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

ดำเนินการซื้อบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้าจากท้องตลาดที่มีส่วนแบ่งการตลาดสูงสุดเป็น 4 ลำดับแรกในประเทศไทย (Bangkok post, 2016) จากนั้นนำบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปมาบดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสารและร่อนผ่านตะแกรงสำหรับร่อนแป้งขนาด 24 mesh บรรจุตัวอย่างที่ได้ใส่ถุงซิปล็อก เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติในด้านต่างๆ ต่อไป

การวิเคราะห์สมบัติของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้า

ศึกษาสมบัติของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้าทั้ง 4 ยี่ห้อ โดยกำหนดสัญลักษณ์เพื่อใช้แทนยี่ห้อที่จัดซื้อจากท้องตลาดเป็นยี่ห้อ A, B, C และ D โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

- องค์ประกอบโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น โปรตีน (factor = 5.7) ไขมันและเถ้า ตามวิธีการของ AOAC (2000) และปริมาณคาร์โบไฮเดรตด้วยวิธีการคำนวณ

- พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความข้นหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA, Newport Scientific, Australia) ใช้วิธีการวัดแบบ STD1 เตรียมตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 14% (w/w) โดยอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting temperature) คือ อุณหภูมิแรกที่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นจากเครื่อง RVA ค่า breakdown คำนวณจาก ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ลบค่าความหนืดต่ำสุด (trough) และค่าการคืนตัว (setback) คำนวณจาก ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ลบจากความหนืดสูงสุด (peak viscosity) (ปิติพร และคณะ, 2546)

- คุณภาพการหุงต้ม (cooking qualities) ตามวิธีการของ AACC (2000) ได้แก่ เวลาที่เหมาะสมในการต้มให้สุก (optimum cooking time) น้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) และปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) ชั่งตัวอย่าง 10 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำต้มเดือด 120 มิลลิลิตร และนำตัวอย่างมากดด้วยกระจกทุก 10 วินาที จนแกนแข็งที่อยู่ภายในตัวอย่างหายไป บันทึกเป็นค่า optimum cooking time เส้นบะหมี่ที่ต้มได้ตาม optimum cooking time เอาชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณเป็นค่า cooking yield ส่วนน้ำที่เหลือจากการต้มนำไประเหยจนเหลือแต่ของแข็งในตู้อบลมร้อน (ED, WTBbinder, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 °C แล้วคำนวณเป็นค่า cooking loss

- ลักษณะเนื้อสัมผัส ดัดแปลงจากวิธีการของ Choy *et al.* (2012) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Stable Micro System, รุ่น TA-XT2) นำตัวอย่างมาต้มในน้ำเดือดตาม optimum cooking time ทำให้เย็นและนำเส้นบะหมี่ที่ได้ (0.5-0.6 กรัม) แบ่งเป็น 6 ส่วน วางบนฐานและอยู่ภายใต้หัววัด โดยวัดค่าความแข็ง (hardness) ค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า (adhesiveness) ค่าความเหนียวคล้ายยาง (gumminess) และค่าความยากในการเคี้ยว (chewiness) วัดด้วยวิธีแบบ TPA ใช้ compression mode ตั้งค่า pre-test, test และ post-test speed 2.00 mm/s และ strain 75% ใช้หัววัดแบบ cylinder probe ขนาด 50 mm (p/50)

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS version 10.0

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

องค์ประกอบโดยประมาณของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้าทั้ง 4 ยี่ห้อ จาก Table 1 พบว่า บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทั้ง 4 ยี่ห้อ มีค่าปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 2.00 - 5.87% และปริมาณไขมันอยู่ในช่วง 17.29 - 19.23% ซึ่งปริมาณความชื้นและไขมันอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป (มอก. 271-2548) กำหนด คือ กำหนดให้มีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 และปริมาณไขมันไม่เกินร้อยละ 20 ของน้ำหนักโดยปริมาณความชื้นและปริมาณไขมันที่แตกต่างกันของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้า อาจเนื่องมาจากกระบวนการผลิตที่ใช้อุณหภูมิและเวลาในการทอดที่แตกต่างกัน (Rekas and Lukasiak, 2015) การใช้สตาร์ชดัดแปรหรืออิมัลซิไฟเออร์ในสูตรมีผลต่อการดูดซับน้ำมัน (Choy *et al.*, 2012; Ding and Yang, 2013) นอกจากนี้ปริมาณโปรตีนของแป้งสาลีที่สูงจะช่วยให้การดูดซับน้ำมันระหว่างทอดน้อยลง เนื่องจากโครงสร้างของเส้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ทำให้มีจำนวนช่องว่างหรือรูพรุนน้อยลง (Rekas and Lukasiak, 2015)

ปริมาณโปรตีนของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทั้ง 4 ยี่ห้อนี้อยู่ในช่วง 8.59 - 9.57% โดยตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 210 (2543) ได้มีการกำหนดให้บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปต้องมีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 8.5 ของน้ำหนัก ซึ่งค่าปริมาณโปรตีนที่วิเคราะห์ได้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยปริมาณโปรตีนที่แตกต่างกันอาจมาจากส่วนผสมที่ใช้ผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป เช่น ปริมาณแป้งสาลีที่ใช้ในสูตร ส่วนผสมอื่นๆ ที่เป็นแหล่งของโปรตีน เช่น ไข่ ถั่วหลือง เป็นต้น นอกจากนี้ชนิดแป้งสาลีและสตาร์ชดัดแปรที่ใช้ในสูตรมีผลต่อปริมาณของโปรตีนที่แตกต่างกัน (Choy *et al*., 2013; กรมวิชาการเกษตร, 2558)

Table 1 Proximate composition of commercial instant noodle

Sample	Content (% dry weight basis)				
	Moisture	Protein	Fat	Ash	Carbohydrate
A	2.00 ± 0.19^{d}	9.57 ± 0.04^{a}	17.48 ± 0.61^{bc}	2.93 ± 0.07^{c}	70.72 ± 1.28^{a}
B	2.33 ± 0.06^{c}	8.59 ± 0.11^{c}	18.08 ± 0.44^{b}	2.22 ± 0.08^{d}	70.83 ± 0.66^{a}
C	5.87 ± 0.20^{a}	8.59 ± 0.02^{c}	19.23 ± 0.60^{a}	3.96 ± 0.13^{a}	65.41 ± 0.79^{b}
D	3.72 ± 0.02^{b}	9.20 ± 0.05^{b}	17.29 ± 0.48^{c}	3.61 ± 0.12^{b}	70.05 ± 0.37^{a}

$^{a,b,c...}$ The mean values in the same column with the different letters are significantly different ($p<0.05$).

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความข้นหนืด

พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความข้นหนืดของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้าทั้ง 4 ยี่ห้อ จาก Table 2 พบว่า บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ A และ C มีค่า peak, final และ setback viscosity ใกล้เคียงกัน โดยค่า peak viscosity เป็นค่าที่บ่งบอกถึง ความสามารถในการจับตัวกับน้ำและแรงที่ต้องใช้ในการกวนหรือผสมในอาหาร ค่า final viscosity เป็นค่าที่บ่งบอกถึง คุณภาพและลักษณะของผลิตภัณฑ์ว่ามีลักษณะเป็นแป้งเปียกหรือเจลเมื่อผ่านการให้ความร้อนและทำให้เย็น ส่วนค่า setback ถ้ามีค่ามากจะมีลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีและมีแนวโน้มที่จะให้เจลที่แข็งมาก (ปิติพร และคณะ, 2546) ซึ่งบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ A และ C มีค่า peak viscosity สูง ส่วน final และ setback viscosity มีค่าต่ำ นั่นแสดงว่า บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ A และ C สามารถจับตัวกับน้ำและทนต่อแรงที่ใช้ในการผสมได้ต่ำ และเมื่อผ่านการให้ความร้อนและเย็นตัวลงจะมีลักษณะเป็นเจลแข็งน้อยกว่า นอกจากนี้บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ C มีค่า peak viscosity และ breakdown สูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Batey *et al.* (1997) ซึ่งพบว่า ค่า peak viscosity และ breakdown มีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัส โดยบะหมี่ที่มีค่า peak viscosity และ breakdown สูงจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของบะหมี่ที่นิ่มกว่า เมื่อพิจารณาค่า pasting temperature หรืออุณหภูมิแรกที่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นจากเครื่อง RVA ของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทั้ง 4 ยี่ห้อ พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 81.26 - 86.68 °C ทั้งนี้เนื่องจากบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปหลังการทอดยังมีสตาร์ชบางส่วนที่ไม่เกิดการเจลาติไนซ์เซชัน (Chewangkul *et al*., 2001) อาจเป็นผลมาจากเวลาในการนึ่งอุณหภูมิและเวลาในการทอด (Chu, 2000)

Table 2 Pasting properties of commercial instant noodle

Sample	Viscosity (RVU)				Pasting Temperature (°C)
	Peak	Breakdown	Final	Setback	
A	143.83 ± 4.26^{b}	2.45 ± 0.71^{c}	226.80 ± 4.91^{b}	85.42 ± 0.96^{c}	86.68 ± 0.89^{a}
B	NA	3.38 ± 0.80^{c}	282.25 ± 7.05^{a}	109.80 ± 2.12^{a}	81.26 ± 0.68^{c}
C	152.22 ± 4.88^{a}	21.65 ± 3.00^{a}	209.40 ± 7.48^{c}	78.83 ± 3.45^{d}	83.13 ± 0.70^{b}
D	NA	7.44 ± 1.74^{b}	277.28 ± 2.88^{a}	103.60 ± 3.36^{b}	84.09 ± 2.22^{b}

$^{a,b,c...}$ The mean values in the same column with the different letters are significantly different ($p<0.05$); NA, not applicable.

ผลการวิเคราะห์คุณภาพการหุงต้ม

ค่า optimum cooking time, cooking loss และ cooking yield ของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้าทั้ง 4 ยี่ห้อ จาก Table 3 พบว่า ค่า optimum cooking time ของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทั้ง 4 ยี่ห้อ อยู่ในช่วง 3.00 - 3.10 นาที ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป (มอก. 271-2548) นั่นคือ เมื่อเติมหรือต้มในน้ำเดือดจะต้องใช้เวลาไม่เกิน 5 นาทีในการต้มบะหมี่ให้สุก ค่า cooking loss ในบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ C มีค่าสูงที่สุด โดยค่า cooking loss จะเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของโครงสร้างร่างแหโปรตีนที่ห้อหุ้มเม็ดสตาร์ชไว้ (Aydin and Gocmen, 2011) และบะหมี่ที่มีคุณภาพดีต้องมีค่า cooking loss ไม่เกิน 12% (Kang *et al*., 2017) ค่า cooking loss ที่มีค่าสูงอาจเกิดจากโครงสร้างร่างแหโปรตีนอ่อนแอ จึงมีผลทำให้สตาร์ชกระจายตัวหรือละลายออกมาในน้ำในระหว่างการต้ม (Aydin and Gocmen, 2011) และทำให้รู้สึกเหนียวเหนอะในปาก (sticky mouth feel) เมื่อบริโภค ส่วนค่า cooking yield ในบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ B และ C มีค่าสูงที่สุด ซึ่งค่า cooking yield คือค่าที่แสดงความสามารถในการดูดซับน้ำและค่านี้มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับปริมาณโปรตีน ($r=-0.96$, $p<0.01$) (Chin *et al*., 2012) โดยพบว่า บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ B และ C ที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ (Table 1) มีค่า cooking yield มาก

Table 3 Cooking qualities of cooked commercial instant noodle

Sample	Optimum cooking time (min)	Cooking loss (%)	Cooking yield (%)
A	3.10	8.60 ± 0.37^{c}	242.57 ± 2.87^{c}
B	3.00	7.89 ± 0.34^{d}	255.40 ± 2.02^{a}
C	3.00	11.08 ± 0.60^{a}	251.91 ± 4.61^{a}
D	3.00	9.39 ± 0.71^{b}	247.93 ± 4.40^{b}

$^{a,b,c...}$ The mean values in the same column with the different letters are significantly different ($p<0.05$).

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

ลักษณะเนื้อสัมผัสของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้าทั้ง 4 ยี่ห้อ จาก Table 4 พบว่า บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อยี่ห้อ B และ C มีค่า hardness, gumminess และ chewiness ใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่ายี่ห้อ A และ D โดยค่า hardness, gumminess และ chewiness มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณโปรตีน ($r=0.97$, $p<0.01$; $r=0.94$, $p<0.01$; $r=0.93$, $p<0.01$ ตามลำดับ) (Hou *et al*., 2013) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Barak *et al*. (2014) ซึ่งพบว่า บะหมี่ที่ทำมาจากแป้งสาลีที่มีปริมาณโปรตีนต่ำจะมีความแข็งแรงของเส้นน้อย เนื่องจากการเกิดโครงสร้างร่างแหของโปรตีนลดลง ดังนั้นปริมาณโปรตีนที่สูงในบะหมี่จะส่งผลต่อค่า hardness, gumminess และ chewiness นอกจากนี้บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ B และ C ที่มีค่า cooking yield (ความสามารถในการดูดซึมน้ำ) สูงที่สุด (Table 3) อาจส่งผลให้โครงสร้างของเส้นบะหมี่อ่อนแอ ดังนั้นบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ B และ C ซึ่งมีปริมาณโปรตีนต่ำและค่า cooking yield สูง จึงให้เนื้อสัมผัสที่นิ่มกว่า ส่วนค่า adhesiveness ของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ C มีค่าสูงที่สุด อาจเนื่องมาจากสตาร์ชเกิดการละลายออกมาในน้ำในระหว่างการหุงต้มมาก (Table 3) และเกาะติดที่ผิวหน้าของเส้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า cooking loss ของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ C ที่มีค่าสูงที่สุด

Table 4 Texture analysis of cooked commercial instant noodle

Sample	Hardness (N)	Adhesiveness (N.sec)	Gumminess	Chewiness
A	35.62 ± 2.21^{a}	0.28 ± 0.05^{c}	24.82 ± 2.15^{a}	22.85 ± 1.96^{a}
B	26.33 ± 3.71^{c}	0.25 ± 0.06^{d}	17.40 ± 2.38^{c}	16.30 ± 2.22^{c}
C	24.94 ± 2.25^{d}	0.41 ± 0.05^{a}	17.71 ± 1.84^{c}	16.25 ± 1.82^{c}
D	29.88 ± 2.01^{b}	0.32 ± 0.07^{b}	19.61 ± 1.96^{b}	17.95 ± 1.92^{b}

$^{a,b,c...}$ The mean values in the same column with the different letters are significantly different ($p<0.05$).

สรุป

บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทางการค้าทั้ง 4 ยี่ห้อมีปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน และค่า optimum cooking time อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมและประกาศกระทรวงสาธารณสุข โดยบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ B และ C มีค่า hardness, gumminess และ chewiness ต่ำ แสดงว่าบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปทั้ง 2 ยี่ห้อจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่ที่นิ่มและเคี้ยวได้ง่ายกว่า ซึ่งค่า hardness, gumminess และ chewiness มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณโปรตีน และมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับค่า cooking yield นอกจากนี้บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อ C มีค่า peak viscosity และ breakdown สูง ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสของบะหมี่นิ่มมากกว่ายี่ห้ออื่นและมีค่า cooking loss สูงที่สุด จึงทำให้มีค่า adhesiveness สูงที่สุดด้วย

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงสาธารณสุข. 2543. **ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง อาหารกึ่งสำเร็จรูป (ฉบับที่210) พ.ศ. 2543.** 19 กันยายน 2543.

กรมวิชาการเกษตร. 2558. **โครงการวิจัยวิจัยพัฒนาและการใช้ประโยชน์จากแป้งพืชศักยภาพ**. แหล่งที่มา: http://www.grad.ku.ac.th/download/stu-sci53-chapter03/?wpdmdl=15453, 13 พฤศจิกายน 2560.

ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, ธงชัย สุวรรณสิชณน์, วิชัย หฤทัยธนาสันติ์ และ กล้าณรงค์ ศรีรอต. 2546. **พฤติกรรมด้านความหนืดและคุณสมบัติทางกลของแป้งเท้ายายม่อม**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2548. **บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป**. มอก. 271-2548.

American Association of Cereal Chemist (AACC). 2000. **Approved Methods of the American Association of Cereal Chemist**. Minnesota: American Association of Cereal Chemist.

Association of Official Analytical Chemists. (AOAC). 2000. **Official Methods of Analysis (17th ed.)**. Arlington: Association of Official Analytical Chemists.

Aydin, E. and D. Gocmen. 2011. Cooking quality and sensorial properties of noodle supplemented with oat flour. **Food Science and Biotechnology** 20 (2): 507-511.

Bangkok post. 2016. **Noodle rumble: Our quest for tasty instant noodles.** Available Source: https://www.bangkokpost.com/print/991113/, December 19, 2017.

Barak, S., D. Mudgil and B.S. Khatkar. 2014. Effect of compositional variation of gluten proteins and rheological characteristics of wheat flour on the textural quality of white salted noodles **International Journal of Food Properties** 17: 731-740.

Batey, I. L., B. M. Curtin and S. A. Moore. 1997. Optimization of rapid-visco analyzer test conditions for predicting Asian noodle quality. **Cereal Chemistry** 74 (4): 497-501.

Chewangkul, L., O. Naivikul, W. Garnjanagoonchorn, C. G. Oates, K. Siroth and T. Suwonsichon. 2001. Microstructural changes in instant noodles during production via triple staining and confocal laser scanning microscopy and scanning electron microscopy. **Kasetsart Journal (Natural Science)** 35: 311-317.

Chin, C. K., N. Huda and T. A. Yang. 2012. Incorporation of surimi powder in wet yellow noodles and its effects on the physicochemical and sensory properties. **International Food Research Journal** 19 (2): 701-707.

Choy. A. L., B. K. May and D.M. Small. 2012. The effects of acetylated potato starch and sodium carboxymethyl cellulose on the quality of instant fried noodles. **Food Hydrocolloids** 26: 2-8.

Choy. A. L., P. D. Morrison, J. G. Hughes, P. J. Marriott and D. M. Small. 2013. Quality and antioxidant properties of instant noodles enhanced with common buckwheat flour. **Cereal Science** 57: 281-287.

Chu. T. 2000. **Factors affecting the structure and oil content of steamed-and-fried instant noodles.** M.S. Thesis, Hong Kong University.

Ding, S. and J. Yang. 2013. The influence of emulsifiers on the rheological properties of wheat flour dough and quality of fried instant noodles. **LWT - Food Science and Technology** 53: 61-69.

Guila, N., V. Dhaka and B. S. Khatkar. 2014. Instant noodles: processing, quality and nutritional aspects. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition** 54: 1386-1399.

Hou, G. G., R. Saini and K. W. Perry. 2013. Relationship between physicochemical properties of wheat flour, wheat protein composition, and textural properties of cooked Chinese white salted noodles. **Cereal Chemistry** 90 (5): 419-429.

Kang, J., J. Lee, M. Choi, Y. Jin, D. Chang, Y. H. Chang, M. Kim, Y. Jeong and Y. Lee. 2017. Physicochemical and textural properties of noodles prepared from different potato varieties. **Preventive Nutrition and Food Science** 22 (3): 246-250.

Park, C. S. and B. K. Baik. 2004. Relationship between protein characteristics and instant noodle making quality of wheat flour. **Cereal Chemistry** 81 (2): 159-164

Rekas, A. and K. M. Lukasiak. 2015. A multivariate study of the correlation between addition of maltodextrin, MCG, HPMC and psyllium on the quality of instant fried noodles. **LWT-Food Science and Technology** 62: 689-696.

World Instant Noodle Association (WINA). 2017. **Global Demand for Instant Noodles.** Available Source: https://instantnoodles.org/en/noodles/market.html, November 12, 2017.

Anti-inflammatory Activity of Rice Phytosterols and γ-oryzanol in THP-1 Macrophages

Mai Shibata[1] and Wasaporn Chanput[1*]

ABSTRACT

Immune modulating effects of three bioactive compounds found in rice bran oil; β-sitosterol, campesterol and γ-oryzanol, were investigated using THP-1 macrophage cell model. β-sitosterol and campesterol belong to a group of phytosterols, while γ-oryzanol is not the case. γ-oryzanol is usually found in conjugated forms, which uniquely exists only in rice bran oil. Cytotoxicity was performed to examine toxicity phytosterols and γ-oryzanol to provide proper working concentrations for gene expression analysis. A range of phytosterols and γ-oryzanol concentrations from 1-12 μM was assayed. The results showed that cytotoxicity was observed as the concentration of phytosterols and γ-oryzanol increased. Concentrations up to 2 μM could provide cell viability more than 85%. This was the case for all three compounds at both resting and inflamed stage. β-sitosterol, campesterol and γ-oryzanol were tested as individuals at 2 μM or as combinations at the final concentration of 2 μM. At resting stage, none of the compounds showed pro-inflammatory activity. At inflamed stage, β-sitosterol showed pro-inflammatory activity, while γ-oryzanol showed a tendency to inhibit expression of pro-inflammatory cytokine genes. For the mixture of β-sitosterol, campesterol and γ-oryzanol, the results showed that immune modulating activities were not depended on types of phytosterols, but rather final concentrations.

Key Words: phytosterol, γ-oryzanol, THP-1 macrophages, immune modulation, inflammation

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

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

The immune system is a host defense system to remove foreign matters or abnormal cells in a living body, which is precisely controlled by a close cooperation with cells, tissues and organs. Immune system is divided in two parts, innate and adaptive immunity. Innate immunity is the first response for infection. It is non-specific and momentary reaction mediated by various white blood cells, for instance, monocytes, macrophage, dendritic cells, and natural killer cells. They release various kinds of cytokines as signals to promote or to inhibit inflammation. Cells belong to adaptive immunity can memorize information about antigens from the first invasion, which make them work quicker and stronger upon the second infection. Modulating the immune system is an important factor to keep the body protective system to function properly.

Phytosterol is a sterol from plants which is one kind of phytochemicals. Phytosterol is widely known as bioactive compounds which can decrease blood cholesterol level by dietary intake (Katan *et al*., 2003 and Demonty *et al*., 2008). Recently, immune modulating functions of phytosterols have been reported. (Demonty *et al*., 2008 and Alappat *et al*., 2010) However, the mechanisms of these effects are still unclear. β-sitosterol is the most popular phytosterol because it shows the highest content in many kinds of plant oils (Sugano *et al*., 1997). γ-oryzanol, which is ferulate ester with phytosterol or triterpene, has been also shown to function as an immune modulating compound. It has been reported to be much more absorbed into small intestine than β-sitosterol (Sugano *et al*., 1997). Rice bran oil is a unique source of phytochemicals, not only plentiful phytosterols, but also γ-oryzanol. However, there are few reports on immune modulating effects of γ-oryzanol and few reports about the interaction among phytosterols. Therefore, the immune modulating effects of phytosterols found in rice bran oil, β-sitosterol, campesterol, and that of γ-oryzanol were studied using THP-1 macrophage cell model.

MATERIALS AND METHODS

1. THP-1 cell culture

The human monocyte THP-1 cell line was purchased from American Type Culture Collection ATCC®. Cell culture and differentiation THP-1 monocyte into macrophage were performed according to the protocol used by Chanput *et al.,* 2010. RPMI-1640 with L-glutamine (Invitrogen, England) was used as a culture medium.

2. Preparation of medium containing phytosterols

γ-oryzanol (Wako Pure Chemical Industries Ltd.), β-sitosterol (TAMA BIOCHEMICAL Co., Ltd) and campesterol (TAMA BIOCHEMICAL Co., Ltd) were dissolved in absolute ethanol (Merck, Germany) and kept at -20 ^{o}C until use. A vial of stock solutions was further dissolved in culture media

until reaching designated concentrations. The final concentration of ethanol in stimulating medium was kept maximally at 0.5%.

3. Treatment of THP-1 macrophage by phytosterols

3.1 Resting stage

THP-1 macrophage at resting stage in 24-well plate was treated with designated concentrations of phytosterols or γ-oryzanol and 0.5% ethanol in culture medium for 3 h. Untreated cells were used as a negative control.

3.2 Inflamed stage

THP-1 macrophage at resting stage in 24-well plate was pre-treated with designated concentrations of phytosterols or γ-oryzanol and 0.5% ethanol in culture medium for 3 h. Then medium was removed and cells were stimulated with stimulating medium containing 100 ng/mL LPS for 6 h.

4. Cytotoxicity assay

Cytotoxicity of phytosterols and γ-oryzanol was tested on THP-1 macrophage in both resting and inflamed stage using MTT assay. After incubation of THP-1 macrophage with phytosterols for 3 h, 3-(4,5-Dimethylthylthiazol-2-yl)-2,5-Diphenyltetrazolium Bromide (MTT; Sigma, United States) solution was added in each well. The final concentration of MTT was 0.5 mg/mL. Then cells were incubated for 2 h at 37 °C. After removal of the medium, the cells were lysed by 100 μL of extraction solvent (dimethyl sulfoxide (DMSO; Fisher Scientific, England) and ethanol were mixed by 1:1). Then absorbance was detected at a wavelength of 570 nm by a microplate reader.

5. Gene expression assay

RNA was extracted from macrophage by following manufacture protocol of Thermo® GeneJET RNA purification kit. RNA purification was performed following manufacture protocol of RNase-free DNase I. Concentration of RNA solution was detected by Thermo® Nanodrop 2000/2000c. Then cDNA was synthesized from RNA solution by following manufacture protocol of Thermo® RevertAid First Strand cDNA Synthesis Kit. Expression of pro-inflammatory cytokine genes; IL-1β, IL-6, IL-8, TNF-α and NF-κB, anti-inflammatory cytokine gene; IL-10, and housekeeping gene GAPDH were determined by real time-PCR. 0.5 μL of cDNA solution was mixed with 5 μL iTaq® Universal SYBR Green Super mix, 4.3 μL RNase-free water, 0.1 μL primer forward solution and 0.1 μL primer reverse solution in 96-well PCR plate. First, as initialization step, plate was heated to 95°C for 5 minutes. As annealing and extension step, the reaction temperature was changed to 95°C for 30 seconds, 60°C for 30 seconds, 75°C for 30 seconds and 78°C for 10 seconds. This step was repeated 40 times.

6. Statistical analysis

The experiment design was CRD (completely randomized design) with 2 independent replications for treatment by phytosterol and two duplications for gene expression analysis. One-way analysis of variance (ANOVA) and Dunnet post-hoc test were used to determine the significant differences between groups. Statistical significance was accepted with $p<0.05$.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Effect of phytosterols and γ-oryzanol on cell viability of THP-1 macrophage.

Each compound was tested their cytotoxicity up to 12 μM. The result showed that cell viability was decreased at high concentrations. More than 85% of cell viability was maintained up to 2 μM of individual β-sitosterol, campesterol or γ-oryzanol (data not shown). Combination between β-sitosterol, campesterol and γ-oryzanol, was also tested at 2 μM as the final concentration. Two compounds were mixed at a ratio of 1:1 or a combination of 3 compounds, each of them was kept at 0.66 μM. More than 85% of cell viability could be observed (data not shown). Similar finding was found in inflamed stage (data not shown). Thus, rice phytosterols; β-sitosterol, campesterol and γ-oryzanol, at concentration of 2 μM were selected for gene expression analysis.

2. Phytosterols and γ-oryzanol as immune modulating agents on THP-1 macrophage.

2.1 Resting stage

The objective to use THP-1 macrophages at resting stages is to investigate whether rice phytosterols and γ-oryzanol have pro-inflammatory activity. Compared with the control (cells incubated with culture medium and 0.5% ethanol), expression of IL-1β and TNF-α gene was significantly reduced by phytosterols and γ-oryzanol (Figure 1A). Expression of IL-6 and NF-κB gene could not be observed. Therefore, it can be concluded that β-sitosterol, campesterol and γ-oryzanol do not have pro-inflammatory activity.

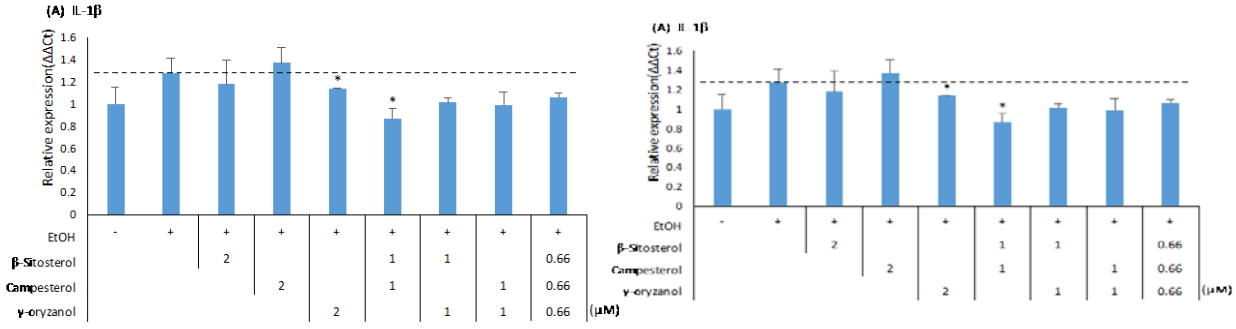


Figure 1 Effect of β-sitosterol, campesterol and γ-oryzanol on gene expression of THP-1 macrophages at resting stage. (A) Interleukin-1β, (B) Tumor necrosis factor-α. *$p<0.05$ with respect to ethanol control.

2.2 Inflamed stage

At inflamed stage, THP-1 macrophages stimulated with 100 ng/ml LPS were used as a positive control. Expression of IL-1β, IL-6, TNF-α, IL-8, IL-10 and NF-κB genes were highly up-regulated after LPS stimulation (Figure 2). Pre-treated THP-1 macrophages with individual β-sitosterol, campesterol or γ-oryzanol for 3 hours, then incubated with LPS for 6 hours could stimulate expression of IL-1β, IL-6 and TNF-α genes (Figure 2A-C). Anti-inflammatory cytokine IL-10 gene was strongly promoted by 1 μM of β-sitosterol or campesterol, approximately 330% compared to the positive control (Figure 2E). For summary of individual treatments, β-sitosterol promoted gene expression of not only pro-inflammatory cytokines (IL-1β, IL-8 and TNF-α) but also anti-inflammatory cytokine IL-10. Campesterol has the smallest effect among the three phytosterols but slightly promote expression of IL-10 gene significantly. γ-oryzanol showed the biggest tendency among the three to inhibit expression of pro-inflammatory cytokines, especially TNF-α gene was significantly inhibited by 1 μM of γ-oryzanol.

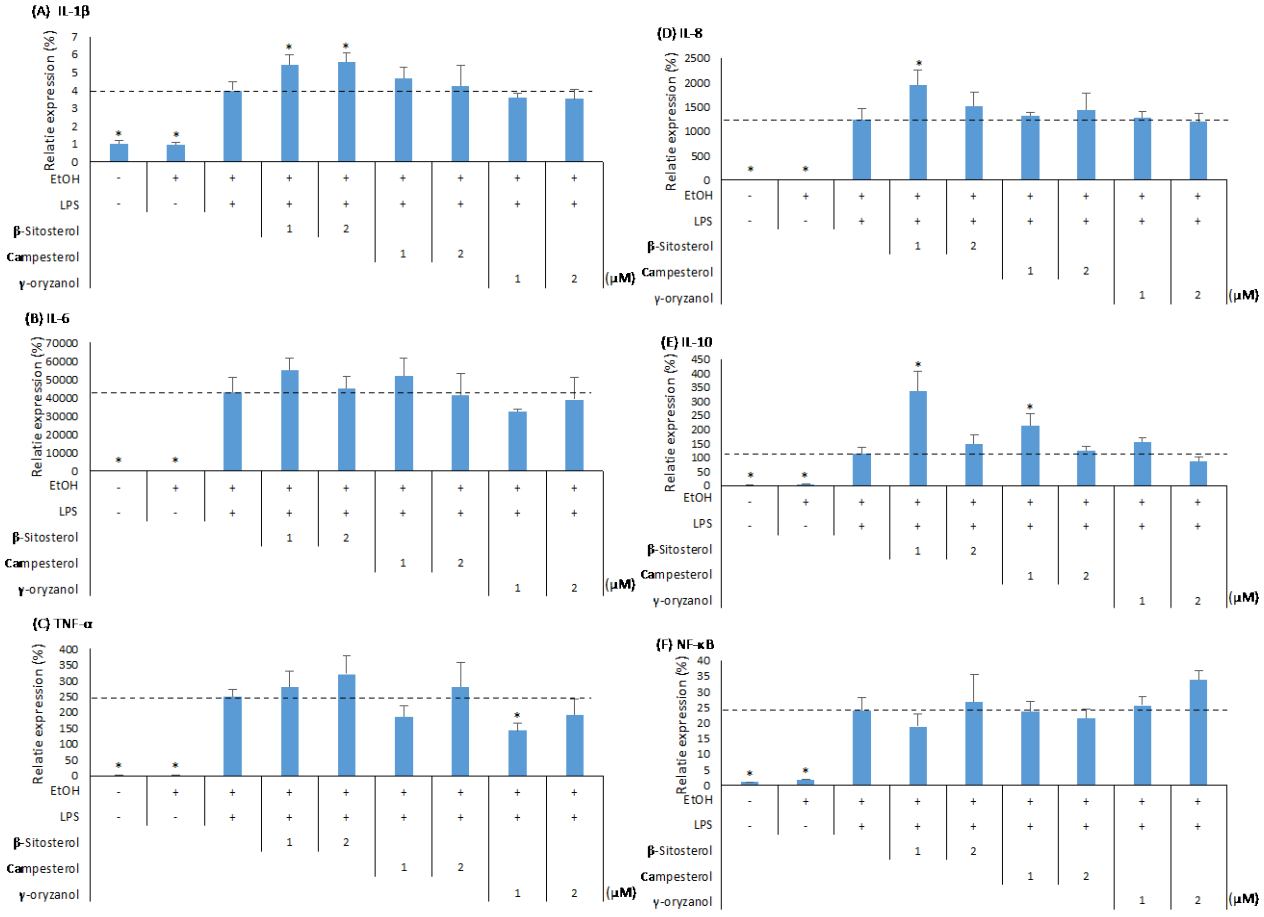


Figure 2 Effect of individual β-sitosterol, campesterol or γ-oryzanol on gene expression of THP-1 macrophages at inflamed stage. (A) Interleukin-1β, (B) Interleukin-6, (C) Tumor necrosis factor-α, (D) Interleukin-8, (E) Interleukin-10, (F) Nuclear factor-kappa B. *p<0.05 with respect to positive control by LPS.

Interestingly, mixture of two compounds of which the final concentration was 1 μM (0.5 μM β-sitosterol + 0.5 μM campesterol, 0.5 μM β-sitosterol + 0.5 μM γ-oryzanol and 0.5 μM campesterol + 0.5 μM γ-oryzanol) promoted gene expression of IL-1β (Figure 3A). IL-6 gene expression was inhibited only mixture of 1 μM β-sitosterol and 1 μM γ-oryzanol (Figure 3B). For TNF-α, several treatments (1 μM β-sitosterol + 1 μM campesterol, 1 μM β-sitosterol + 1 μM γ-oryzanol, 1 μM campesterol + 1 μM γ-oryzanol and 0.33 μM β-sitosterol + 0.33 μM campesterol+ 0.33 μM γ-oryzanol) inhibited gene expression compared with positive control (Figure 3C). Only 1 μM β-sitosterol + 1 μM campesterol promoted gene expression of IL-10 (Figure 3E) and there is no significant difference observed among treatments on IL-8 and NF-κB (Figure 3D and F). As summary of these results, mixture of two kinds from phytosterols and γ-oryzanol had an effect on gene expression induced by LPS. However, tendency of these effects seemed to depend not only choices of compounds but also final concentration. Three pro-inflammatory genes, IL-1β, IL-6 and TNF-α, exhibited pro-inflammatory effect from 1 μM + 1 μM mixture but anti-inflammatory effect from 0.5 μM + 0.5 μM mixture, comparatively. Interestingly, mixtures of more than two compounds often showed different tendency to modulate expression of inflammatory cytokines, compared with individual phytosterol or γ-oryzanol (Figure 2 and 3). In addition, even individual compounds showed different tendency, mixture of two compounds showed similar tendency following total concentration. Gene expression of IL-10 at inflamed stage was influenced only mixture of 1 μM β-sitosterol and 1 μM Campesterol.

It seems that γ-oryzanol showed a tendency of among three compounds to inhibit expression of pro-inflammatory cytokines, especially TNF-α is significantly inhibited by 1μM of γ-oryzanol. It has been reported that γ-oryzanol could have a function to inhibit NF-κB activation of macrophage and inhibit following inflammation cascades (Nagasaka *et al*., 2007). While, there are several contrast reports about pro- and anti-inflammation activity of β-sitosterol. Anti-inflammatory effect of β-sitosterol for murine macrophages was reported (Valerio *et al*., 2011). There are two hypotheses to explain mechanisms of phytosterols and γ-oryzanol influencing expression of inflammatory cytokine genes. First one is up- or down-regulation of TLR4 receptor pathway (Valerio *et al*., 2013). Second one is inhibit NF-κB activation and following pro-inflammatory signals (Nagasaka *et al*., 2007). Stimulation of TLR4 results in activation of NF-κB. First, activated TLR4 by recognition of lipopolysaccharide or inflammatory cytokines, which are signal of infection, remove an inhibitory subunit IκB bounding with NF-κB. Then free NF-κB translocates to the nucleus to up-regulate transcription of cytokines to induce and promote inflammation (Lu *et al.,* 2008). Phytosterols and γ-oryzanol was considered to affect both or either of two factors, TLR4 or NF-κB. In both cases, how β-sitosterol affected those is still unclear. We need to clarify the point of action in the mechanism for farther application of phytosterols and γ-oryzanol as immune modulating compound

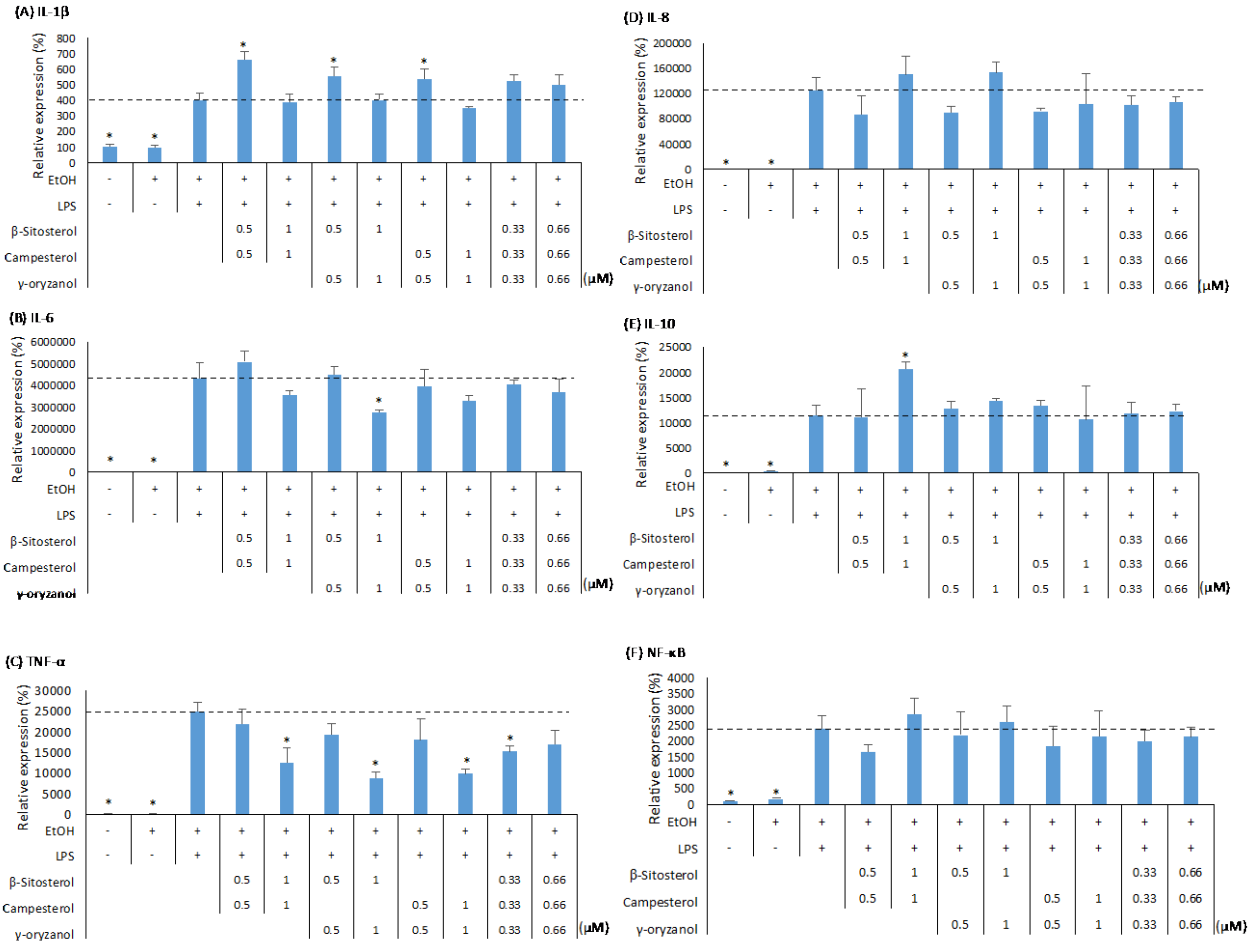
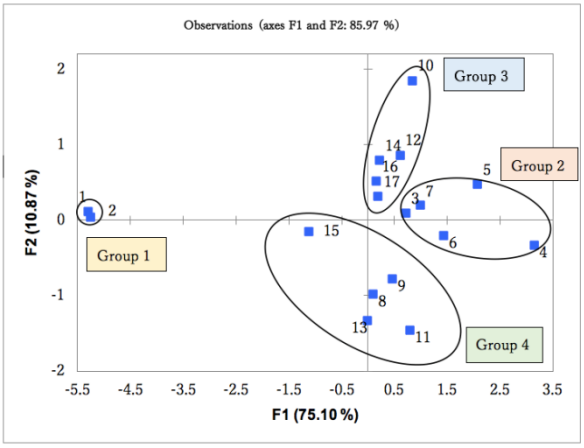


Figure 3 Effect of combination of β-sitosterol, campesterol and γ-oryzanol on gene expression of THP-1 macrophages at inflamed stage. (A) Interleukin-1β, (B) Interleukin-6, (C) Tumor necrosis factor-α, (D) Interleukin-8, (E) Interleukin-10, and (F) Nuclear factor-kappa B. *p<0.05 with respect to positive control by LPS.

Seventeen treatments of inflamed stage were analyzed using PCA cluster analysis, in which they were divided into four groups (Figure 4). Group 1 contains treatment no.1 and 2, which do not contain LPS. Group 2 contains treatment no.3 (LPS treatment) and also treatment no.4-7. Group 3 consists of treatment no. 10, 12, 14, 16 and 17, while treatment no. 8, 9, 12, 13 and 15 was clustered in group 4. PCA cluster analysis shows that treatments in group 3 and 4 are different from LPS treatment, in which they seem to exhibit anti-inflammatory and pro-inflammatory activity, respectively. From this information, mixture of phytosterols and γ-oryzanol has been considered to have interactions to each other. It is because results of mixture did not reflect the characteristic that is derived from gene expression assay by individual phytosterol or γ-oryzanol. Regardless of kind of molecular from three compounds, mixture had characteristic effect depending on final total concentration.



Treatment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0.5% EtOH	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
100 ng/ mL LPS	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
β-sitosterol (μM)				1	2					0.5	1	0.5	1			0.33	0.66
Campesterol (μM)						1	2			0.5	1			0.5	1	0.33	0.66
γ-oryzanol (μM)								1	2			0.5	1	0.5	1	0.33	0.66

Group 1 Group 2 Group 3 Group 4

Figure 4 Principal component analysis (PCA) of gene expression at the inflamed stage.

CONCLUSION

For resting stage of THP-1 macrophage, there were no difference on gene expression of inflammatory cytokines by treatment of β-sitosterol, campesterol and γ-oryzanol. Among individual β-sitosterol, campesterol and γ-oryzanol, immune modulating effect of each compound on LPS-stimulated macrophage was different. β-sitosterol showed most pro-inflammatory effect and γ-oryzanol showed most anti-inflammatory effect. PCA analysis showed immune modulating effects of these treatments on six genes, including pro-inflammatory cytokines, anti-inflammatory cytokines and NF-κB, could be divided into three groups. They are “no effect group”, “pro-inflammatory effect group” and “anti-inflammatory effect group”. Types of compound and concentration can affect them. *Ex vivo* and *in vivo* experiments should be performed to draw definite conclusion on immune modulation of rice phytosterols and γ-oryzanol.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from The Graduate School Scholarship for Double or Joint Degree Programs 2016, Japan Public-Private Partnership Student Study Abroad Program, Natural sciences/cross-disciplinary course of TOBITATE! Young Ambassador Program and the Thailand Research Fund (grant number MRG60801940) were gratefully acknowledged.

REFERENCES

Chanput, W., Mes, J., Vreeburg, R. A., Savelkoul, H. F. and Wichers, H. J. 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(3): 254-261.

Demonty, I., Ras, R. T., van der Knaap, H. C., Duchateau, G. S., Meijer, L., Zock, P. L. and Trautwein, E. A. 2008. Continuous dose-response relationship of the LDL-cholesterol–lowering effect of phytosterol intake. **The Journal of nutrition**. 108(10): 1-14.

Katan, M. B., Grundy, S. M., Jones, P., Law, M., Miettinen, T., Paoletti, R. and Participants, S. W. 2003. Efficacy and safety of plant stanols and sterols in the management of blood cholesterol levels. **Mayo Clinic Proceedings**. 78(8): 965-978.

Lu, Y. C., Yeh, W. C. and Ohashi, P. S. 2008. LPS/TLR4 signal transduction pathway. **Cytokine**, 42(2): 145-151

Nagasaka, R., Chotimarkorn, C., Shafiqul, I. M., Hori, M., Ozaki, H. and Ushio, H. 2007. Anti-inflammatory effects of hydroxycinnamic acid derivatives. **Biochemical and Biophysical Research Communications**. 358(2): 615-619.

Sugano, M. and Tsuji, E. 1997. Rice bran oil and cholesterol metabolism. **The Journal of nutrition**. 127(3): 521S-524S.

Valerio, M. and Awad, A. B. 2011. **β**-Sitosterol down-regulates some pro-inflammatory signal transduction pathways by increasing the activity of tyrosine phosphatase SHP-1 in J774A. 1 murine macrophages. **International immunopharmacology**. 11(8): 1012-1017.

ผลของสภาวะในการลวกต่อการสูญเสียปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและสีของกระเจี๊ยบเขียว

Effect of Blanching Conditions on Antioxidant and Color Loss of Okra (*Hibicusesculentus L.*)

ศรัญญา เรืองสว่าง[1] ปาริชาต เคร่งครัด[1] และ **นิรมล อุตมอ่าง**[1*]

Saranya Ruangsawang[1], Parichart Krengkrat[1] and **Niramon Utama-amg**[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสภาวะในการลวกต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและสีของกระเจี๊ยบเขียว วางแผนการทดลองแบบ 2^3 Central composite design (CCD) โดยผันแปรเวลาที่ใช้ในการลวก 2 ระดับ คือ 120 และ 270 วินาที ความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 0.20 และ 0.50 และความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ร้อยละ 0.04 และ 0.08 จากผลการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเจี๊ยบเขียวลวก คือ เวลาในการลวก 120 วินาที, ความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 0.20 และความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 0.04 ตามลำดับ กระเจี๊ยบเขียวลวกมีค่าสี L*, a* และ b* เท่ากับ 38.24, 0.45 และ 19.15 ตามลำดับ มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 33.45 มิลลิกรัมสมมูลวิตามินซีในตัวอย่าง 100 กรัมน้ำหนักสด มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด เท่ากับ 2.67 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกในตัวอย่าง 1 กรัมน้ำหนักสด และพบว่ามีความชอบด้านลักษณะที่ปรากฏ, สี, กลิ่น, กลิ่นรส, ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม เท่ากับ 7.71, 7.57, 7.71, 7.43, 7.57 และ 7.57 คะแนน ตามลำดับ

ABSTRACT

This research aimed to study the effect of different blanching conditions on antioxidant and color loss of Okra (*Hibicusesculentus L.).* A 2^3 Central composite design (CCD) was used to optimize blanching condition of blanching time (120, 270 s), concentration of citric acid (0.20, 0.50%), and concentration of magnesium carbonate (0.04, 0.08%). The optimum conditions were blanching time at 120 s using 0.20% citric acid and 0.04% magnesium carbonate. L*, a* and b* values of blanched okra were 38.24, 0.45 and 19.15, respectively. The scavenging activity was 33.45 mg ascorbic acid equivalent/100 g wet basis and the total phenolics content was 2.67 mg Gallic acid equivalent/g wet basis. The sensory acceptability scores of appearance, color, aroma, flavor, texture and overall liking were 7.71, 7.57, 7.71, 7.43, 7.57 and 7.57, respectively.

Key Words: okra, blanching, antioxidant activity, color

*Corresponding author; e-mail address: niramon.u@cmu.ac.th

[1]สาขาเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50100

[1]Department of Product Technology, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50100.

บทนำ

กระเจี๊ยบเขียว (*Hibicusesculentus* L.) เป็นผักที่โตเร็วและสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตฝักสดได้เร็ว มีขนาดและคุณภาพฝักดี เนื้อสัมผัสอ่อน ไม่มีเส้นใย (กรมวิชาการเกษตร, 2545) กระเจี๊ยบเขียวมีวิตามินซีและแคลเซียมสูงเมื่อเทียบกับผักชนิดอื่น นอกจากนี้ยังประกอบด้วยกัม (gum) และเพคติน (pectin) ในปริมาณสูงทำให้อาหารที่ประกอบขึ้นมีลักษณะเป็นเมือก ช่วยป้องกันอาการหลอดเลือดตีบตัน รักษาโรคความดันโลหิต บำรุงสมอง และลดอาการโรคกระเพาะอาหาร โดยนิยมนำฝักอ่อนของกระเจี๊ยบเขียวมาลวกรับประทาน หรือนำมาประกอบอาหารในเมนูต่างๆ ซึ่งการลวก (blanching) นั้น เป็นการนำเอาอาหารสัมผัสกับน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 70-105°C เป็นระยะเวลาสั้นๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายเอนไซม์ (enzyme) ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสีย เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวของกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) แต่การลวกจะส่งผลปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระลดลง เนื่องจากการใช้ความร้อนสูง และยังมีผลต่อสีของอาหาร ทำให้มีสีซีดหรือจางลง ซึ่งสีเป็นลักษณะคุณภาพแรก ที่ผู้บริโภครับรู้ได้ในผักและผลไม้ และยังเป็นคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดที่ผู้บริโภคใช้ในการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์และรสชาติโดยไม่ต้องสัมผัส ดังนั้นสีของผักและผลไม้จึงถือว่าเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญสำหรับผู้บริโภคในการประเมินคุณภาพ ความชอบ และการยอมรับของผู้บริโภค โดย Nuray และคณะ 2005 ได้ศึกษาการเติมไอออนของสังกะสี (Zn^{2+}) หรือทองแดง (Cu^{2+}) เพื่อแทนที่แมกนีเซียมไอออนในโมเลกุลของคลอโรฟิลล์จะได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีความคงตัวมากขึ้น โดยเฉพาะในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด และการใช้กรดซิตริกและกรดแอสคอร์บิกในการลวกหัวเทอร์นิพ พบว่า มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและป้องกันการสูญเสียสารประกอบฟีนอลทั้งหมดได้ในระหว่างการจัดเก็บแช่แข็ง (Sidonia *et al*., 2013)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเวลาในการลวก ความเข้มข้นของกรดซิตริกและความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ สี และลักษณะเนื้อสัมผัสในการลวกกระเจี๊ยบเขียว เพื่อให้กระเจี๊ยบเขียวที่ผ่านการลวก ยังคงมีสีและลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดี เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัตถุดิบ

กระเจี๊ยบเขียวพันธุ์เขียว จากตลาดเมืองใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ โดยคัดเลือกฝักที่มีความยาว 10 – 15 cm. และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 - 2.0 cm. และทำการเลือกกระเจี๊ยบเขียวที่มีสีใกล้เคียงกันมากที่สุด

การทดลองศึกษาสภาวะของการลวกกระเจี๊ยบเขียว

วางแผนการทดลองแบบ 2^3 Central composite design (CCD) (ตารางที่ 1) โดยผันแปร 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ ได้แก่ เวลา (120, 270 วินาที) ความเข้มข้นของกรดซิตริก (0.20, 0.50) และความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) (ร้อยละ 0.04, 0.08) กำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้ในการลวกกระเจี๊ยบเขียวเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส (M.R. *et al*., 2014) ทำให้เย็นทันทีในอ่างน้ำเย็น (Ice bath) อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สะเด็ดน้ำและนำกระเจี๊ยบเขียวใส่ลงในถุงซิปล็อค นำไปแช่แข็งในตู้แช่เยือกแข็ง (air blast freezer) ที่อุณหภูมิ – 30 องศาเซลเซียส และมีอัตราการแช่เยือกแข็งที่ 1 – 2 องศาเซลเซียสต่อนาที (Sidonia *et al*., 2013)

Table 1 Treatment combinations of Okra *(Hibicusesculentus L.)*. Blanching

Tr.	Time (min)	Citric acid (%)	Magnesium carbonate (%)	Tr.	Time (min)	Citric acid (%)	Magnesium carbonate (%)
1	120 (-1)	0.20 (-1)	0.04 (-1)	9	69 (-1.68)	0.35 (0)	0.06 (0)
2	270 (1)	0.20 (-1)	0.04 (-1)	10	321 (1.68)	0.35 (0)	0.06 (0)
3	120 (-1)	0.50 (1)	0.04 (-1)	11	195 (0)	0.10 (-1.68)	0.06 (0)
4	270 (1)	0.50 (1)	0.04 (-1)	12	195 (0)	0.60 (1.68)	0.06 (0)
5	120 (-1)	0.20 (-1)	0.08 (1)	13	195 (0)	0.35 (0)	0.03 (-1.68)
6	270 (1)	0.20 (-1)	0.08 (1)	14	195 (0)	0.35 (0)	0.09 (-1.68)
7	120 (-1)	0.50 (1)	0.08 (1)	15	195 (0)	0.35 (0)	0.06 (0)
8	270 (1)	0.50 (1)	0.08 (1)				

การวัดสี

โดยใช้เครื่อง HunterLab (Color Quest II Sphere, USA) แหล่งกำเนิดแสง IIluminant D_{65} และ Observation 10° ทำการวัดค่าสีในระบบ CIE เป็นค่าสี L* (Lightness) ค่า a* โดยที่ +a เป็นค่าสีแดง –a เป็นค่าสีเขียว และค่า b* โดยที่ +b เป็นค่าสีเหลือง –b เป็นค่าสีน้ำเงิน และวัดค่าความแตกต่างของสีเป็นค่า ΔE^*_w (Total color difference with white standard) ΔE^*_g (Total color difference with green standard) และ ΔE^*_F (Total color difference with fresh okra)

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

โดยใช้เครื่อง TA.XT plus Texture Analyzer, Stable Micro System ทดสอบด้วยวิธี texture profile analysis โดยใช้แรงกด (compression test), Pre – Test Speed; 60.0 mm/min, Test Speed; 120.0 mm./min, Post – Test Speed; 600 mm./min, Target Mode; Strain, Strain; 75.0%, Trigger Type; Auto (Force) และ Trigger Force; 0.049 N รายงานค่าเป็น ค่า Hardness คือ แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการกดหรือเทียบได้กับการเคี้ยวครั้งแรก มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

การเตรียมสารสกัดจากกระเจี๊ยบเขียว (ดัดแปลงจากวิธีของ ดลฤดี พิชัยรัตน์ และคณะ (2557))

ชั่งตัวอย่าง 25 กรัม (น้ำหนักสด) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมเอธานอลเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปิดฝาและนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารสกัดที่ได้ผ่านกระดาษกรองเบอร์ 4 นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที กรองสารสกัด ที่ได้ผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 เก็บสารสกัดในขวดสีชาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content) (ดัดแปลงจาก Zhang et al., 2009)

ปิเปตสารสกัดปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองที่มีน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 3 นาที เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 7 ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที ในที่มืด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน และรายงานผลในหน่วยของมิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกในตัวอย่าง 1 กรัมน้ำหนักสด (จากกราฟมาตรฐาน $y = 3.325x - 0.0189$; $R^2 = 0.9959$ เมื่อ y คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 760 นาโนเมตร และ x คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก)

การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH (2,2-Diphenyl-1-picryl-hydrazyl) (ดัดแปลงจาก ดลฤดี พิชัยรัตน์ และคณะ, 2557)

ปิเปตสารสกัดปริมาตร 0.4 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 0.07 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5.6 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร รายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมของวิตามินซีในตัวอย่าง 100 กรัมน้ำหนักสด (จากกราฟมาตรฐาน $y = 0.0427x - 0.0545$; $R^2 = 0.9943$ เมื่อ y คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานวิตามินซี และ x คือ ร้อยละการต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH (%Scavenging activity))

$$\text{ร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ (\%Scavenging activity)} = [(A_{Control} - A_{Sample})/A_{Control}] \times 100$$

เมื่อ $A_{Control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร ของสารละลายเอธานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 กับสารละลาย DPPH และ A_{Sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร ของสารละลายตัวอย่างกับสารละลาย DPPH

การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อกระเจี๊ยบเขียวลวกในแต่ละสิ่งทดลอง

การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคจำนวน 50 คน โดยวิธีหาอัตราความชอบ (Hedonic scaling) ให้อัตราความชอบเป็น 9 คะแนน โดยที่ 1 คือไม่ชอบมากอย่างยิ่ง 5 คือเฉยๆ และ 9 คือชอบมากอย่างยิ่ง ประเมินความชอบด้านลักษณะปรากฏ (Appearance) ด้านสี (color) ด้านกลิ่น (Odor) ด้านกลิ่นรส (Flavor) ด้านเนื้อสัมผัส (Texture) และความชอบโดยรวม (Overall liking) กับผู้บริโภคจำนวน 50 คน

การทดสอบการยอมรับผลิตภัณฑ์สุดท้าย (กระเจี๊ยบเขียวลวกแช่เยือกแข็ง)

นำกระเจี๊ยบเขียวมาทดสอบคุณลักษณะด้านประสาทสัมผัสหลังการแช่เยือกแข็ง ขั้นแรกจะให้ผู้บริโภคประเมินผลิตภัณฑ์กระเจี๊ยบเขียวลวกแช่เยือกแข็ง ได้แก่ ด้านลักษณะปรากฏ (Appearance) ด้านสี (color) และความชอบโดยรวม (Overall liking) และขั้นตอนที่ 2 นำกระเจี๊ยบเขียวลวกแช่เยือกแข็งมาอุ่นด้วยไมโครเวฟกำลังวัตต์ 800 วัตต์ เป็นเวลา 30 วินาที นำไปทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค ได้แก่ ด้านลักษณะปรากฏ (Appearance) ด้านสี (color) ด้านกลิ่น (Odor) ด้านกลิ่นรส (Flavor) ด้านเนื้อสัมผัส (Texture) และความชอบโดยรวม (Overall liking) โดยการให้คะแนนความชอบแบบ 9-point hedonic scale กับผู้ทดสอบจำนวน 50 คน

การวิเคราะห์เชิงสถิติ

การศึกษาสภาวะของการลวกกระเจี๊ยบเขียว ใช้วิธีวิเคราะห์พื้นที่ตอบสนอง โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Program software version 6.0.2 (Statease Inc., Minneapolis, USA) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะในการลวกกระเจี๊ยบเขียว

ผลและอภิปรายผล

จากการทดสอบผลิตภัณฑ์กระเจี๊ยบเขียวลวกที่เวลา, ความเข้มข้นของกรดซิตริก และความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่สภาวะที่แตกต่างกัน ทำให้ได้สิ่งทดลองทั้งหมด 15 สิ่งทดลอง โดยได้ผลการทดลองดังรูปที่ 1 เมื่อนำไปทดสอบค่าสีระบบ CIE ดังตารางที่ 2 พบว่า ค่าสี L*, a* และ b* ของแต่ละสิ่งทดลองนั้น มีค่า L* และค่า b* ที่มีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.7362 และ 0.5726 ตามลำดับ โดยค่าแนวโน้มของค่าสี L* พบว่าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของกรดซิตริกเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกรดสามารถทำให้ค่า L* มีค่าเพิ่มมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการลวกโดยการใช้กรดจะมีสีที่สว่างเพิ่มมากขึ้น (Nuray *et al*, 2005) สำหรับค่า b* พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณกรดซิตริกเพิ่มมากขึ้นหรือส่งผลต่อค่า b* ในทิศทางลบ แต่พบว่าค่า L* และค่า b* จะมีแนวโน้มสำหรับเวลาและแมกนีเซียมคาร์บอเนตเหมือนกันนั่นคือ ถ้ายิ่งมีเวลาในการลวกและมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีค่า L* และ b* ลดลง

Tr.1 Tr.2 Tr.3 Tr.4 Tr.5 Tr.6 Tr.7 Tr.8 Tr.9 Tr.10 Tr.11 Tr.12 Tr.13 Tr.14 Tr.15

Figure 1 Color with different condition of blanching the Okra (*Hibicusesculentus* L.)

เนื่องจากทำการวัดค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ ΔE^*_w (Total color difference with white standard) ΔE^*_g (Total color difference with green standard) และ ΔE^*_F (Total color difference with fresh okra) พบว่าค่า ΔE^*_w แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.6465 โดยพบว่าค่า ΔE^*_w เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีเวลาในการลวกและความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น แต่จะลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของกรดซิตริกเพิ่มมากขึ้น

เมื่อนำกระเจี๊ยบเขียวลวกแต่ละสภาวะไปทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH ดังตารางที่ 3 พบว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของกระเจี๊ยบเขียวลวกของแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.5031 พบว่า ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (% Scavenging activity) จะลดลงเมื่อมีเวลาในการลวก, ความเข้มข้นของกรดซิตริก และความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มมากขึ้น การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในกระเจี๊ยบเขียวลวกและใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน พบว่าในแต่ละสภาวะของกระเจี๊ยบเขียวลวกมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8440 พบว่า

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการลวก ความเข้มข้นของกรดซิตริกเพิ่มมากขึ้นและมีความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนตลดลง

Table 2 Color value of blanched okra

Treatment	L*	a^{*ns}	b*	ΔE^*_w	$\Delta E^{*\ ns}_G$	$\Delta E^{*\ ns}_F$
Std. Fresh okra	33.23±1.8	-9.42±0.2	21.46±0.9	-	-	-
Std. White	94.57±0.0	-0.83±0.0	-0.32±0.0	-	-	-
Std. Green	37.02±0.0	-22.37±0.0	9.16±0.0	-	-	-
1	37.39±1.9	-3.62±0.4	22.48±2.8	7.77±1.8	61.71±1.0	23.17±2.0
2	34.63±0.6	-0.34±0.3	17.30±0.9	10.14±0.4	62.48±0.4	23.63±0.4
3	39.24±1.6	-0.14±0.8	19.25±0.9	11.36±1.4	58.71±1.5	24.58±0.8
4	36.02±0.6	1.42±0.6	16.73±1.3	12.24±0.3	61.04±0.5	25.02±0.9
5	34.47±1.0	-0.65±0.7	16.50±1.5	10.32±0.2	62.44±0.5	23.13±1.0
6	33.32±1.0	-0.99±0.5	16.20±0.3	9.99±0.5	63.44±1.0	22.83±0.5
7	33.41±1.0	-2.20±0.4	16.88±1.5	8.71±0.9	63.57±1.1	21.97±0.8
8	32.25±1.1	1.81±0.6	17.01±0.6	12.20±0.4	64.75±1.0	25.90±0.6
9	37.81±1.0	0.90±0.4	21.46±1.1	11.38±0.7	60.83±0.6	26.37±0.9
10	34.97±1.2	2.27±0.2	15.64±0.4	13.23±0.1	61.79±1.1	25.59±0.3
11	33.76±1.6	-1.45±0.3	16.84±1.1	9.42±0.4	63.20±1.3	22.60±0.5
12	37.30±2.5	0.56±0.1	17.67±1.7	11.80±0.5	60.09±1.9	24.63±0.6
13	36.59±0.7	1.77±0.4	16.91±0.4	12.56±0.4	60.55±0.5	25.37±0.4
14	34.11±0.8	-0.73±0.3	16.56±1.4	10.14±0.3	62.79±0.6	23.11±0.7
15	35.47±1.8	1.41±0.5	17.84±1.2	11.83±0.5	61.89±1.5	25.45±0.7

Values are mean±SD and ns = non-significant (Significant at 0.05 level.)

การทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคต่อกระเจี๊ยบเขียวลวกทั้งหมด 15 ตัวอย่าง โดยคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ความชอบด้านลักษณะที่ปรากฏ (Appearance), ด้านสี (Color), ด้านกลิ่น (Odor), ด้านกลิ่นรส (Odor) ด้านเนื้อสัมผัส (Texture) และความชอบโดยรวม (Overall linking) ทำการทดสอบกับผู้บริโภคจำนวน 50 คน พบว่าทุกคุณลักษณะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลและได้สมการ Regression Model พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9273, 0.9235, 0.9890, 0.9826, 0.9398 และ 0.9294 ตามลำดับ ในตารางที่ 5 โดยพบว่าเวลาที่ใช้ในการลวกและความเข้มข้นของกรดซิตริกมีผลต่อทุกคุณลักษณะในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อมีเวลาเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความชอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคลดลง แต่ปัจจัยด้านความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคทั้งด้านบวกและด้านลบ โดยความชอบด้านคุณลักษณะที่ปรากฏ, ความชอบด้านสี และความชอบโดยรวม พบว่า ถ้ามีความเข้มข้นของเกลือคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้คุณลักษณะเหล่านี้ได้รับคะแนนความชอบจากผู้บริโภคสูง ในทางตรงกันข้ามพบว่าความชอบด้านกลิ่น,

ความชอบด้านกลิ่นรส และความชอบด้านเนื้อสัมผัสจะมีค่าลดลง เมื่อมีความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่สูงขึ้น

Table 3 The antioxidant activity of blanched okra

Tr.	% Scavenging activity (mg Vit.C/100g wet basis)	TPC (mg Gallic acid/g wet basis)	Tr.	% Scavenging activity (mg Vit.C/100g wet basis)	TPC (mg Gallic acid/g wet basis)
1	33.52±0.01	2.72±0.01	9	34.87±0.01	2.69±0.01
2	26.30±0.01	2.36±0.01	10	24.98±0.01	1.80±0.01
3	32.71±0.01	2.75±0.01	11	37.37±0.01	2.48±0.01
4	32.09±0.01	2.73±0.01	12	27.31±0.01	2.49±0.01
5	34.60±0.01	2.56±0.01	13	32.44±0.01	2.78±0.01
6	28.68±0.01	2.38±0.02	14	28.19±0.01	2.34±0.01
7	24.09±0.01	2.38±0.01	15	24.61±0.01	2.11±0.01
8	25.93±0.01	2.30±0.01			

Values are mean±SD and ns = non-significant (Significant at 0.05 level.)

Table 4 Sensory evaluation of blanched okra

Treatment	Appearance	Color	Odor	Flavor	Texture	Overall liking
1	7.89±1.0	8.00±0.9	7.44±1.0	7.44±1.0	7.44±0.8	7.44±1.0
2	4.78±1.1	4.78±1.1	6.44±1.1	6.44±1.1	6.22±1.2	5.22±0.8
3	5.11±0.7	5.11±0.7	6.11±1.3	6.22±1.0	6.11±1.0	5.33±1.1
4	2.44±1.0	2.22±0.8	5.67±0.9	5.67±0.9	5.67±0.7	3.44±1.5
5	8.22±1.0	8.22±1.0	7.33±1.1	7.44±1.0	7.44±1.0	7.78±0.9
6	5.11±1.4	4.67±1.3	6.33±1.2	6.56±1.0	6.44±1.3	5.00±1.1
7	5.78±1.1	5.33±0.7	7.00±0.9	6.78±1.3	7.11±0.7	5.67±1.2
8	2.44±0.8	2.11±0.7	5.67±0.9	5.56±1.2	4.89±1.3	3.33±0.8
9	7.56±1.1	7.78±1.0	7.56±0.8	7.33±0.9	6.89±1.1	7.78±1.1
10	2.44±0.8	2.33±0.7	5.89±0.7	5.78±0.6	5.78±0.6	3.44±1.1
11	7.56±1.3	7.33±1.2	7.33±1.1	7.33±1.1	7.22±1.1	7.11±0.9
12	3.11±1.0	2.89±1.3	5.89±0.9	6.00±0.8	5.89±1.0	3.89±1.1
13	3.56±0.8	3.33±0.9	5.78±1.3	5.89±1.4	5.33±1.1	4.22±0.6
14	5.89±1.7	6.00±1.2	6.11±1.4	6.22±1.4	6.33±0.9	6.11±1.3
15	4.56±0.8	4.56±0.7	6.22±1.1	6.22±1.1	6.00±1.5	5.22±0.6

Scores are based on a 9-point hedonic scale with 1 = dislike extremely, 9 = like extremely.

เมื่อนำค่าตอบสนองของกระเจี๊ยบเขียวลวกในแต่ละสภาวะมาทดสอบทางสถิติ พบว่า ค่าตอบสนองที่มีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ได้แก่ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (%Radical scavenging), ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด, L*, b* และ ΔE^{*}_{w} ส่วนความชอบทางด้านประสาทสัมผัสของผู้บริโภค พบว่าทุกคุณลักษณะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ได้แก่ ความชอบด้านลักษณะที่ปรากฏ (Appearance), ด้านสี (Color), ด้านกลิ่น (Odor), ด้านกลิ่นรส (Odor), ด้านเนื้อสัมผัส (Texture) และความชอบโดยรวม (Overall linking)

Table 5 Regression model of blanching methods on antioxidant and color loss of Okra *(Hibicusesculentus L.)*

Acceptability	Regression Model	R - Square	P - Value
%Scavenging	= 43.64 – 0.02*Time – 12.30*Citric acid – 67.57*$MgCO_3$	0.5031	0.0458
TPC	= 3.21 + 2.09*10^{-3}*Time + 0.07*Citric acid – 6.23*$MgCO_3$	0.5403	0.0307
L*	= 40.62 – 0.01*Time + 3.44*Citric acid – 65.87*$MgCO_3$	0.7362	0.0016
b*	= 23.39 – 0.02*Time – 0.58*Citric acid – 35.68*$MgCO_3$	0.5726	0.0210
ΔE^{*}_{w}	= 58.80 + 6.72*10^{-3}*Time – 3.53*Citric acid + 51.31*$MgCO_3$	0.6465	0.0077
Appearance	= 11.17 – 0.02*Time – 8.55*Citric acid +12.12*$MgCO_3$	0.9273	<0.0001
Color	= 11.33 – 0.02*Time – 8.54*Citric acid + 10.94*$MgCO_3$	0.9235	<0.0001
Odor	= 12.12 – 0.03*Time – 13.80*Citric acid – 6.53*$MgCO_3$ + 5.b 92*10^{-5}*$Time^2$ + 15.93*$Citric\ acid^2$ + 43.72*$MgCO_3{}^2$ – 3.17*10^{-3}*Time*Citric acid +4.48*10^{16}*Time*$MgCO_3$ + 5.95*Citric acid*$MgCO_3$	0.9890	0.0002
Flavor	= 12.22 – 0.02*Time – 17.35*Citric acid – 0.07*$MgCO_3$ + 4.27*10^{-3}*$Time^2$ + 15.15*$Citric\ acid^2$ + 0.18*$MgCO_3$ + 0.01*Time*Citric acid + 0.04*Time*$MgCO_3$ + 23.81*Citric acid*$MgCO_3$	0.9826	0.0007
Texture	= 12.34 – 0.02*Time – 17.70*Citric acid – 15.46*$MgCO_3$ + 5.27*$Time^2$ + 19.34*$Citric\ acid^2$ + 235.73*$MgCO_3{}^2$ + 7.94*Time*Citric acid – 0.06*Time*$MgCO_3$ +14.88*Citric acid*$MgCO_3$	0.9398	0.0142
Overall liking	= 9.92 – 0.01*Time – 6.19*Citric acid + 6.96*$MgCO_3$	0.9294	<0.0001

เมื่อนำค่าตอบสนองที่มีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มาหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลวกกระเจี๊ยบเขียว คือ เวลาในการ

ลวก, ความเข้มข้นของกรดซิตริก และความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนต เท่ากับ 120 วินาที, 0.20% และ 0.04% ตามลำดับ และค่า Desirability เท่ากับ 0.881 ทำให้สามารถทำนายค่าตอบสนองได้ดังรูปที่ 5

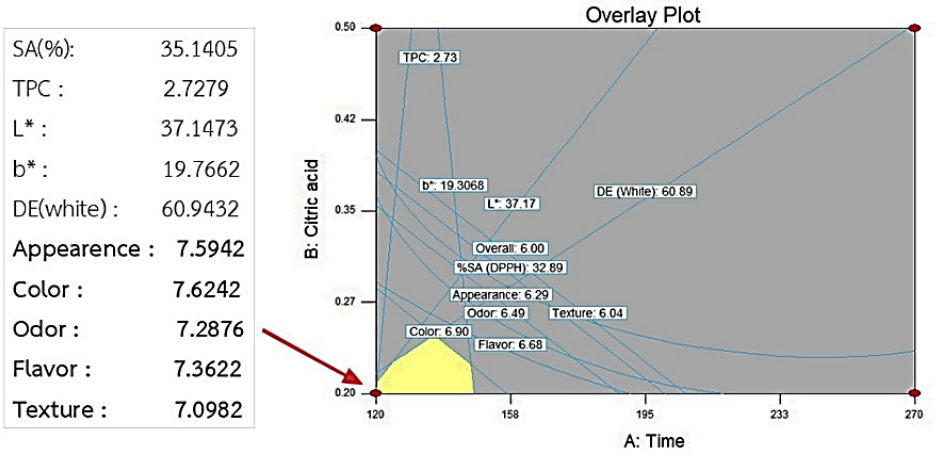


Figure 5 Overlay plots showing optimization of blanching methods on antioxidant and color loss of Okra *(Hibicusesculentus L.)*

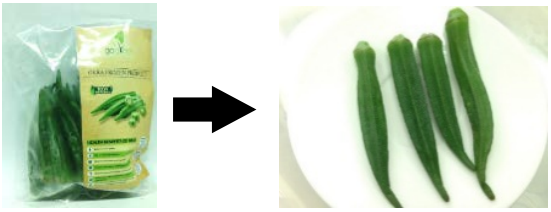


Figure 6 Final Product of blanching okra; Frozen of blanching okra (left), Thawed of final product

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด นำไปแช่แข็งโดยใช้ตู้แช่แข็งแบบหมุนวน (Air blast freezer) เพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย เมื่อทดสอบความชอบของผู้บริโภคจำนวน 50 คน พบว่า ผู้บริโภคมีความชอบทางประสาทสัมผัสต่อผลิตภัณฑ์กระเจี๊ยบเขียวลวกแช่แข็งในทุกคุณลักษณะอยู่ในระดับชอบปานกลาง ดังตารางที่ 6 เมื่อนำผลิตภัณฑ์กระเจี๊ยบเขียวลวกแช่แข็งมาละลายน้ำแข็งโดยใช้การอุ่นด้วยไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ เป็นเวลา 30 วินาที ผู้บริโภคมีความชอบต่อผลิตภัณฑ์กระเจี๊ยบเขียวลวก ได้แก่ ด้านลักษณะที่ปรากฏ, ด้านสี, ด้านกลิ่น, ด้านกลิ่นรส, ด้านลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม เท่ากับ 7.71, 7.57, 7.71, 7.43, 7.57 และ 7.57 คะแนน ตามลำดับ ดังตารางที่ 6 และพบว่าที่ผู้บริโภคมีการยอมรับผลิตภัณฑ์กระเจี๊ยบเขียวลวกแช่แข็งสำเร็จรูปร้อยละ 90

Table 6 Sensory evaluation of frozen okra and after thaw 1 minute the okra.

Treatment	Appearance	Color	Odor	Flavor	Texture	Overall liking
Frozen okra	7.57±1.0	7.71±0.9	7.71±0.9	-	-	-
After thaw 30 sec.	7.71±0.9	7.57±0.7	7.71±0.7	7.43±0.7	7.57±1.2	7.57±0.5

Values are mean±SD

Scores are based on a 9-point hedonic scale with 1 = dislike extremely, 9 = like extremely.

สรุปผล

การศึกษากระบวนการลวกกระเจี๊ยบเขียว พบว่ามีสภาวะที่เหมาะสม คือ เมื่อใช้เวลาในการลวก 120 วินาที, ความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 0.20 และความเข้มข้นของเกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 0.04 ตามลำดับ จะทำให้กระเจี๊ยบเขียวลวกยังคงมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและสีเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยการลวกสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสีย โดยการใช้กรดก็เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถทำให้สีของผลิตภัณฑ์สว่างมากขึ้น และการใช้เกลือแมกนีเซียมสามารถรักษาหรือเพิ่มสีเขียวให้แก่กระเจี๊ยบเขียวได้ ซึ่งสามารถนำหลักการข้างต้นไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทใกล้เคียงกันได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์ บุคลากร และคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านสถานที่ อุปกรณ์ ในกระดำเนินงานในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2545. เกษตรดีที่เหมาะสมสำหรับกระเจี๊ยบเขียว. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด กรุงเทพฯ. 22 หน้า.

ดลฤดี พิชัยรัตน์ และ นพรัตน์ มะเห. 2557. ผลของการลวกต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของผักพื้นบ้านภาคใต้บางชนิด. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 6(2): 36-46.

Karim R.M., Islam M.S., Sarkar M.S., Murugan C.A., Makky A.E., Rashid S.S. and Yusoff M.M. 2014. Anti-amylolytic activity of fresh and cooked okra (*Hibiscus esculentus* L.) pod extract. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 3: 373–377.

Koca N., Karadeniz F. and Burdurlu S.H. 2007. Effect of pH on chlorophyll degradation and colour loss in blanched green peas. Food Chemistry. 100(2): 609–615.

Martínez S., Pérez N., Carballo J. and Franco I. 2013. Effect of blanching methods and frozen storage on some quality parameters of turnip greens (“grelos”). Food Science and Technology. 5: 383-392.

Zhang Z., Nakano K. and Maezawa S. 2009. Comparison of the antioxidant enzymes of broccoli after cold or heat shock treatment at different storage temperatures. Postharvest Biology and Technology. 54: 101–105.

การพัฒนาคำศัพท์ของใบมะกรูดสดและผ่านการทำแห้ง

Establishment of Vocabulary on Fresh and Dried Kaffir Lime Leaves

ณัฐวดี มาลา[1] และ สุจินดา ศรีวัฒนะ[1*]

Nattawadee Mala[1] and Sujinda Sriwattana[1*]

บทคัดย่อ

ใบมะกรูดเป็นสมุนไพรที่มีกลิ่นหอมและเป็นส่วนประกอบในอาหารที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และมักใช้กระบวนการอบแห้งเพื่อรักษาใบมะกรูดให้เก็บไว้ได้นานขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบคำศัพท์ที่พัฒนาขึ้นและเค้าโครงทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาของใบมะกรูดรวมถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะกลิ่นร่วมด้วย โดยศึกษาจากใบมะกรูดสด ใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้ และใบมะกรูดอบแห้งทางการค้า ซึ่งคำศัพท์ของใบมะกรูดที่ประเมินจากการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา ได้แก่ สีเขียว กลิ่นมะกรูด กลิ่นซิตรัส กลิ่นเขียว กลิ่นอับ กลิ่นใบไม้แห้ง กลิ่นรสใบมะกรูด กลิ่นรสซิตรัส กลิ่นรสเขียว กลิ่นรสใบไม้แห้ง รสขม ความซ่า ความเผ็ดร้อน และความเฝื่อน และพบว่าในทุกๆ คุณลักษณะของทั้ง 3 ตัวอย่าง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) การวิเคราะห์หาองค์ประกอบ (Gas chromatography-mass spectrometry; GC-MS) และลักษณะกลิ่น (Gas chromatography-olfactometry; CG-O) พบว่ามีองค์ประกอบและลักษณะกลิ่นของใบมะกรูดสด ใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้ และใบมะกรูดอบแห้งทางการค้าทั้งหมด 12, 14 และ 15 องค์ประกอบ ตามลำดับ

ABSTRACT

Kaffir lime leaves are widely used as aromatic herb and food ingredient. Drying process is required to preserve kaffir lime leaves for extending the shelf life. The objective of this research was to establish vocabulary and descriptive sensory profile including with chemical compounds and odor characteristics of fresh, developed dried and commercial dried kaffir lime leaves. The vocabulary of kaffir lime leaves consisted of green color, kaffir lime odor, citrus odor, green odor, musty odor, dried leaves odor, kaffir lime leaves flavor, citrus flavor, green flavor, dried leaves flavor, bitter, tingle, spicy and astringent. In every attributes of three samples were significantly different ($p \leq 0.05$). Volatile compounds and odor characteristics were investigated by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and gas chromatography-olfactometry (GC-O), respectively. Twelve, fourteen and fifteen aroma compounds and odor characteristic of fresh, developed dried and commercial dried kaffir lime leaves were reported.

Key Words: kaffir lime leaves, fresh, dry, sensory analysis, GC-MS, GC-O

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

[1]สาขาวิชาการพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่ 50100

[1]Division of Product Development Technology, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University, Chiang Mai 50100

คำนำ

มะกรูด (*Citrus hystrix* D.C.) เป็นพืชตระกูลส้มทางเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ผลิตภัณฑ์จากต้นมะกรูดที่นำมาใช้มากที่สุด คือ ใบมะกรูด ซึ่งมีรูปทรงคล้ายนาฬิกาทรายและมีกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ โดย Citronellal เป็นสารระเหยให้กลิ่นหลักที่พบในน้ำมันหอมระเหยของใบมะกรูด (ประมาณ 80%) (Lawrence *et al*., 1971;) ใบมะกรูดยังสามารถใช้ได้ทั้งใบสดและใบแห้งอีกด้วย (Tasirin *et al*., 2014) ซึ่งในการทดลองก่อนหน้าได้ทำการหาวิธีการเตรียมวัตถุดิบขั้นต้นและกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมพบว่า การเตรียมวัตถุดิบโดยการลวกในสารละลายแมกนีเซียมคาร์บอเนตแล้วอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศทำให้ใบมะกรูดอบแห้งมีสีเขียวใกล้เคียงกับใบสดและปริมาณคงเหลือของ citronellal มากที่สุด ทั้งนี้ยังไม่พบว่ามีการประเมินทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาในใบมะกรูด ซึ่งการให้ความสำคัญต่อข้อกำหนดคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยใช้การประเมินทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนามีส่วนช่วยในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ (Gacula, 1997) จึงมีความสนใจในการพัฒนาคำศัพท์เพื่อเป็นข้อกำหนดในผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดต่อไป ซึ่งโดยทั่วไปการประเมินทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาจะทำการวิเคราะห์ร่วมกับGas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) และ Gas chromatography-olfactometry (GC-O) เพื่อหาองค์ประกอบและลักษณะกลิ่นที่พบ (Xiao *et al*., 2015) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคำศัพท์และสร้างเค้าโครงทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะกลิ่นของใบมะกรูด

อุปกรณ์และวิธีการ

ตัวอย่างใบมะกรูด

ใบมะกรูดที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ใบมะกรูดสด ได้มาจากตลาดเมืองใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้โดยการลวกในสารละลายแมกนีเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.06 แล้วอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ ใช้ความดันสุญญากาศ -650 มิลลิเมตรปรอท แมกนีตรอน 800 วัตต์ จำนวน 6 ชุด เป็นเวลา 30 นาที(จากการทดลองเบื้องต้น) และใบมะกรูดอบแห้งทางการค้า ได้มาจากห้างสรรพสินค้าในจังหวัดเชียงใหม่ (ยี่ห้อนี้มีสีเขียวใกล้เคียงกับใบสดและปริมาณคงเหลือของ citronellal มากที่สุด) เตรียมตัวอย่างใบมะกรูดโดยการปั่นให้ละเอียดแล้วใส่ลงในขวดปริมาณ 1 กรัม ปิดปากขวดด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์เจาะรูสำหรับทดสอบการดมกลิ่น สำหรับสีและกลิ่นรสใช้ทั้งใบใส่ในถุงซิปล็อค

การประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา

การคัดเลือกผู้ทดสอบ ผู้ทดสอบที่จะผ่านการคัดเลือกต้องระบุรสให้ถูกต้องทั้งหมด ระบุกลิ่นหรืออธิบายกลิ่นให้ถูกต้องอย่างน้อย 8 กลิ่น และต้องทำการเรียงลำดับความเข้มข้นของสารละลายรสชาติพื้นฐานให้ถูกต้องและต้องผ่านการฝึกฝนอย่างน้อย 10 ครั้ง (ครั้งละ 2 ชั่วโมง) โดยในใบมะกรูดอบแห้งจะทำการประเมินทั้งตัวอย่างก่อนคืนตัวและหลังคืนตัว (คืนตัวที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที) ตัวอย่างจะถูกเสิร์ฟแก่ผู้ทดสอบทีละตัวอย่าง และในการทดสอบดมกลิ่นทำการดมจากขวด ส่วนการชิมจะให้ผู้ทดสอบเคี้ยวแล้วคายทิ้ง ผู้ทดสอบที่ผ่านการคัดเลือกและฝึกฝนจำนวน 10 คน ทำการอภิปรายเพื่อหาคุณลักษณะ/คำศัพท์ที่สำคัญที่พบในใบมะกรูดตามลำดับการรับรู้ก่อน-หลัง และอธิบายถึงความหมายของคุณลักษณะที่พบ จากนั้นทำการอภิปรายเพื่อหาตัวอย่างอ้างอิงที่ใช้พร้อมทั้งสเกลของตัวอย่างอ้างอิงนั้นๆ ผู้ทดสอบทำการประเมินโดยการให้คะแนนความเข้มลงบนเส้นตรงยาว 15 เซนติเมตร (ASTM, 1992) 3 ซ้ำ และทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน

(Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significance Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม Minitab 16.0

การวิเคราะห์กลิ่นรสทางเคมี

สกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยวิธีการแช่ในสารละลายเฮกเซน (maceration) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เข้มข้นแล้วฉีดน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ลงไปในแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสส์สเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatography - mass spectrometer; GC-MS) ซึ่งมีสภาวะดังต่อไปนี้ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นสารระเหยจะถูกพาเข้าสู่เครื่อง GC โดยก๊าซฮีเลียมด้วยอัตราการไหล 2.0 มิลลิลิตรต่อนาที สารจะถูกแยกด้วยแคปิลารีคอลัมน์ DB-1 (ยาว 30 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร และฟิล์มหนา 0.25 ไมโครเมตร) ร่วมกับการตั้งโปรแกรมอุณหภูมิของ oven ของเครื่อง GC โดยอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 4 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 12 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส (Jirapakkul *et al.*, 2013) การระบุชนิดสารทำโดยเปรียบเทียบข้อมูล mass spectra ที่ได้ของสารระเหยแต่ละชนิดกับ HP Wiley 275 library ของสารแต่ละชนิดกับฐานข้อมูลอื่น และมีค่า % Identity to library มากกว่า 70% การวิเคราะห์ลักษณะกลิ่นโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-ออลเฟกทอรี (Gas chromatograph - olfactometer, GC-O) ใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการคัดเลือกและฝึกฝนจำนวน 5 คน เพื่อศึกษาสารให้กลิ่นสำคัญในใบมะกรูดโดยใช้สภาวะของเครื่องเช่นเดียวกับ GC-MS โดยลักษณะกลิ่นที่ได้จะพิจารณาจากผู้ทดสอบรับรู้กลิ่นนั้นมากกว่า 50% ของผู้ทดสอบและงานวิจัยที่ตีพิมพ์แล้ว

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผู้ทดสอบทำการพัฒนาคำศัพท์ หาคำนิยาม และตัวอย่างอ้างอิงได้ดัง Table 1 จากผลการทดลองพบว่าใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้ก่อนการคืนตัว ดังแสดงใน Figure 1(a) ใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้ก่อนการคืนตัวมีคุณลักษณะด้านสีเขียวใกล้เคียงกับใบมะกรูดสดและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ด้านกลิ่นซิตรัสและกลิ่นมะกรูดของใบมะกรูดอบแห้งที่ทำการพัฒนาได้เข้มกว่าตัวอย่างทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) นอกจากนั้นกลิ่นซิตรัสของใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้ยังมีความเข้มมากกว่าใบมะกรูดสดอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) อาจเนื่องมาจากกระบวนการทำแห้งทำให้สารบางชนิดมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหรือมีการสร้างสารขึ้นมาใหม่ อาจเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชัน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หรือการปลดปล่อยสารประกอบจากผนังเซลล์พืชที่ถูกทำลาย (Huopalahti *et al.*, 1985; Raksakantong *et al.*, 2012) ส่วนใบมะกรูดอบแห้งทางการค้าหลังการคืนตัวแสดงดัง Figure 1(b) พบว่า เมื่อทำการคืนตัวด้านสีเขียวของใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้มีความเข้มใกล้เคียงกับใบมะกรูดสดอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) กลิ่นรสใบมะกรูดตัวอย่างสดและตัวอย่างที่พัฒนาได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) จะสังเกตได้ว่าคุณลักษณะส่วนใหญ่ของใบมะกรูดสดจะมีความเข้มมากกว่าใบมะกรูดอบแห้งที่ผ่านการคืนตัวทั้ง 2 ตัวอย่าง

การวิเคราะห์หาสารประกอบโดยเทคนิค GC-MS และดมกลิ่นโดยเทคนิค GC-O ในใบมะกรูดสด ใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้ และใบมะกรูดอบแห้งทางการค้า แสดงดัง Table 2 พบว่าในใบมะกรูดสด ใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้ และใบมะกรูดอบแห้งทางการค้าพบองค์ประกอบทั้งหมด 12, 14 และ 15 องค์ประกอบ ตามลำดับ โดยองค์ประกอบที่พบในปริมาณมากที่สุด คือ citronellal (83.71, 27.08 และ 66.01% ตามลำดับ)

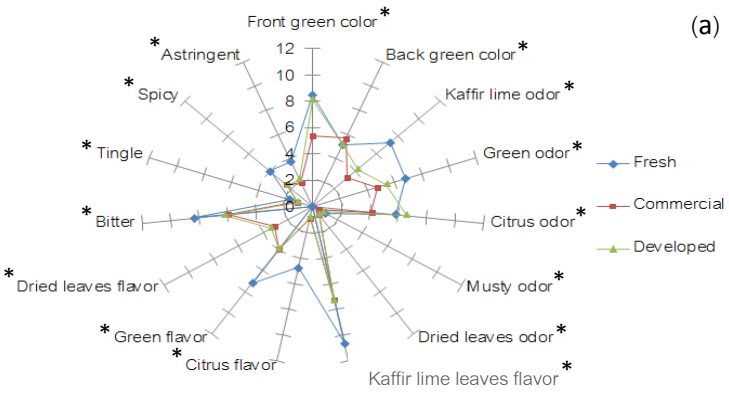
Table 1 Definitions and standard reference intensity ratings used to evaluate kaffir lime leaves

Attributes	Definition	Intensity (cm)
Appearance		
Green color	The intensity of green color on kaffir lime leaves.	2.5 GY 4/4 = 1.5 (front leaf)[c] 7.5 GY 3/4 = 7.5 (front leaf)[c] 7.5 GY 2/4 = 13.5 (front leaf)[c] 2.5 GY 6/4 = 1.5 (back leaf)[c] 7.5 GY 4/4 = 13.5 (back leaf)[c]
Odor		
Kaffir lime	Aromatic associated with kaffir lime (citronellal).	Citronellal 20% in Bertolli Extra Virgin olive oil = 1.0 Citronellal 100% = 8.5
Citrus	Aromatic associated with citrus fruit.	Lemon grass = 3.0[d] Lemon juice = 9.0[d]
Green	Aromatic associated with green vegetables.	Dried longan leaves = 3.0 (50 ºC for 6 h in hot air oven) Pomelo leaves = 9.0 Weigh 1.0 g, blend and place in a bottle
Musty	Aromatic associated with damp closed spaces.	Potatoes = 1.0[b] King oyster mushroom = 4.5[f] Weigh 10.0 g, slice and place in a bottle
Dried leaves	Aromatic of dried leaves.	Dried longan leaves = 4.0 (50 ºC for 6 h in hot air oven) McCormick Dried parsley = 12.0[a]
Flavor		
Kaffir lime leaves	Flavor associated with kaffir lime leaves.	Kaffir lime leaves : water 1 : 50 = 2.0 Kaffir lime leaves : water 1 : 25 = 6.0 Kaffir lime leaves : water 1 : 10 = 12.0 Blend, filter and serve liquid part.
Citrus	Flavor associated with citrus fruit.	Kaffir lime juice : water 1 : 100 = 1.0 Kaffir lime juice : water 1 : 20 = 6.0 Kaffir lime juice : water 1 : 10 = 10.0

Table 1 Continued

Attributes	Definition	Intensity (cm)
Green	Flavor associated with green vegetables.	McCormick Dried parsley = 3.0[c] Weigh 15 g, put in 300 mL of hot water for 15 min. Filter and serve liquid part Fresh parsley = 9.0[c] Weigh 25 g, blend with 300 mL of water. Filter and serve liquid part.
Dried leaves	Flavor of dried leaves.	McCormick Dried parsley : water 1 : 100 = 2.0[a] McCormick Dried parsley : water 1 : 84 = 5.0[a] McCormick Dried parsley : water 1 : 42 = 8.0[a] Put in hot water for 15 min, filter and serve liquid part.
Taste		
Bitter	The taste on the tongue associated with caffeine.	Caffeine solution 0.035% = 5.0[c] Caffeine solution 0.07% = 10.0[c]
After taste		
Tingle	A feeling of an increased sensation on the tongue that may be due to intense carbonation.	Soda : water 1 : 4 = 0.5 Soda : water 1 : 2 = 4.5 Soda : water 1 : 0 = 10.0
Spicy	The warming sensation in the mouth.	Ginger powder : water 1 : 80 = 2.0[g] Ginger powder : water 1 : 60 = 3.5[g] Ginger powder : water 1 : 30 = 7.0[g]
Astringent	The dry puckering mouthfeel associated with an alum solution.	Alum solution 0.03% = 1.5[c] Alum solution 0.10% = 5.0[c]

[a] = Chambers *et al.* (2016)
[b] = Koppel and Chamber (2010)
[c] = Lee and Chambers (2007)
[d] = Monteleone and Langstaff (2014)
[e] = Munsellbook vol.1
[f] = Park *et al.* (2009)
[g] = Smyth *et al.* (2012)



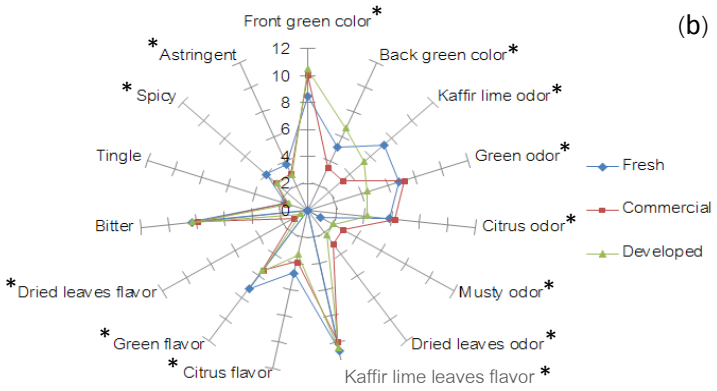


Figure 1 Spider plot representation of flavor profile for before rehydration (a) and after rehydration (b) of kaffir lime leaves (Fresh = Fresh kaffir lime leaves, Commercial = Commercial dried kaffir lime leaves and Developed = Developed dried kaffir lime leaves, * = Significantly different)

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของใบมะกรูดโดยเทคนิค GC-MS กับการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนามีความสอดคล้องกัน คือ ทั้งสองวิธีสามารถระบุกลิ่นมะกรูด กลิ่นซิตรัส กลิ่นใบไม้แห้ง เป็นต้น แต่บางกลิ่น เช่น กลิ่นเขียว ก็ไม่สามารถตรวจพบได้โดย GC-MS อาจเนื่องมาจากเกิดการทับซ้อนกับพีคของตัวทำละลาย (Jirapakkul *et al.*, 2013) และบางกลิ่นไม่สามารถตรวจพบได้ในการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา เช่น กลิ่นการบูร กลิ่นเครื่องเทศ เป็นต้น จากการวิเคราะห์ GC-MS พบว่า ในใบมะกรูดอบแห้งทางการค้าจะมี Isopulegol และ Neoisopulegol ซึ่งไม่พบในใบมะกรูดสดและใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้ แต่ α-cubebene พบในใบมะกรูดอบแห้งทั้ง 2 ตัวอย่างแต่ไม่พบในใบมะกรูดสด ส่วนใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้พบ β-myrcene และ β-cubebene ซึ่งไม่พบทั้งในใบมะกรูดสดและใบมะกรูดอบแห้งทางการค้า และ Decanoic acid ไม่พบในใบมะกรูดอบแห้งที่พัฒนาได้ ซึ่งการเกิดขึ้นหรือหายไปขององค์ประกอบต่างๆ อาจเกิดจากวิธีการทำแห้ง รวมถึงเวลาในการทำแห้ง ทำให้สารบางชนิดมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหรือมีการสร้างสารขึ้นมาใหม่ เช่น การเกิดออกซิเดชัน การไฮโดรไลซิส หรือการปล่อยสารประกอบจากการแตกออกของผนังเซลล์ (Raksakantong *et al.*, 2012)

Table 2 Volatile compounds and odor characteristics of fresh kaffir lime leaves, developed dried kaffir lime leaves and commercial dried kaffir lime leaves

Retention time	Compound	Odour charactesitics	Composition (%)			% Identity to library
			F	C	D	
6.23	β-phellandrene	Spice[a]	1.46	5.40	0.68	97
6.71	β-myrcene	Kaffir lime leaves[b]	nd	nd	0.41	74
10.06	δ-3-carene	Lemon[a]	2.67	29.68	1.60	86
11.51	Isopulegol	-	nd	3.96	nd	98
11.83	Citronellal	Kaffir lime leaves[a,b]	83.71	27.08	66.01	97
11.86	Neoisopulegol	-	nd	2.61	nd	95

Table 2 Continued

Retention time	Compound	Odour charactesitics	Composition (%)			% Identity to library
			F	C	D	
14.32	β-citronellol	Fresh kaffir lime leaves[b]	5.65	18.48	4.34	97
18.36	Citronellyl acetate	Lemon[b]	1.94	6.13	7.22	91
19.00	Copaene	Spice[b]	0.42	1.86	1.22	98
19.47	α-cubebene	Herb[b]	nd	1.14	0.87	95
20.36	Caryophyllene	Wood, Spice[a]	2.18	9.21	7.33	99
21.41	α-caryophyllene	Wood, Spice[a]	0.33	1.22	0.87	95
22.26	β-cubebene	Citrus[b]	nd	nd	0.50	90
22.73	Camphene	Camphor[a]	0.63	1.85	2.23	93
23.54	Naphthalene	Dry[a]	0.50	2.03	1.29	96
24.77	β-farnesene	Dried kaffir lime leaves[b]	0.63	3.24	1.35	89
30.74	Decanoic acid	Fatty[a]	0.90	5.15	nd	90

F = Fresh kaffir lime leaves
C = Commercial dried kaffir lime leaves
D = Developed dried kaffir lime leaves
nd = Not detected
[a] = Citrus Research and Education Center (2006)
[b] = Jirapakkul *et al*. (2013)

สรุป

การพัฒนาคำศัพท์ใบมะกรูด โดยวิธีการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา โดยใช้ผู้ประเมินที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 10 คน พบว่า คุณลักษณะที่สำคัญ สีเขียว กลิ่นมะกรูด กลิ่นซิตรัส กลิ่นเขียว กลิ่นอับ กลิ่นใบไม้แห้ง กลิ่นรสใบมะกรูด กลิ่นรสซิตรัส กลิ่นรสเขียว กลิ่นรสใบไม้แห้ง รสขม ความซ่า ความเผ็ดร้อน และความเฝื่อน เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารให้กลิ่นโดยวิธี GC-MS และ GC-O พบว่าองค์ประกอบและลักษณะกลิ่นที่ได้มีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะด้านกลิ่นทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา ซึ่งมีลักษณะกลิ่นส่วนใหญ่ คือ กลิ่นใบมะกรูด และกลิ่นซิตรัส เป็นต้น และคำศัพท์ที่ได้ยังมีประโยชน์สำหรับผู้ผลิตในการควบคุมผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดอบแห้ง และผลิตภัณฑ์เทียบเคียงอื่นๆได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมาการวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนทุนในการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา

เอกสารอ้างอิง

ASTM, Committee E-18. 1992. **Manual on descriptive analysis testing for sensory evaluation, ASTM Manual series: MNL 13.** American Society for Testing and Materials., Philadephia.

Chambers E. IV., Sanchez, K., Uyen X. T. Phan, Miller, R., Gail V. C. and Donfrancesco, D. B. 2016. Development of a “living” lexicon for descriptive sensory analysis of brewed coffee. **Journal of Sensory Studies**. 31: 465-480.

Citrus Research and Education Center. 2006. **Citrus flavor and color**. Available Source: http://www.crec.ifas.ufl.edu/crec_websites/Rouseff/, June 9, 2016.

Gacula M. C. 1997. **Descriptive Sensory Analysis in Practice**. Food & Nutrition Press, Inc. Trumbull, Connecticut, USA.

Huopalahti, R., Kesalahti, R. and Linko, R. 1985. Effect of hot air and freeze drying on the volatile compounds of dill (*Anethum graveoh* L.). **Journal of Agricultural Science in Finland**. 57: 133-138.

Jirapakkul W., Tinchan P. and Chaseri S. 2013. Effect of drying temperature on key odourants in kaffir lime (*Citrus hystrix* D.C., Rutaceae) leaves. **International Journal of Food Science & Technology**. 48: 143-149.

Koppel, K. and Chambers, E. IV. 2010. Development and application of a lexicon to describe the flavor of pomegranate juice. **Journal of Sensory Studies**. 25: 819-837.

Lawrence, B. M., Hogg, J. W., Terhune, S. J. and Podimuang, V. 1971. Constituents of the leaf and peel oil of *Citrus Hystrix*, D.C. **Phytochemistry**. 2: 1404–1405.

Lee, J. and Chambers, D. H. 2007. A lexicon for flavor descriptive analysis of green tea. **Journal of Sensory Studies**. 22: 256-272.

Monteleone, E. and Langstaff, S. 2014. Sensory Methods for Optimizing and Adding Value to Extra Virgin Olive Oil. 1st ed. **Olive Oil Sensory Science**. John Wiley & Sons, Ltd. 109-140.

Park, S., Elless, M. P., Park, J., Jenjins, A., Lim, W., Chambers, E. IV. and Hirschi, K.D. 2009. Sensory analysis of calcium-biofortified lettuce. **Plant Biotechnology Journal**. 7: 106-117.

Raksakantong, P., Siriamornpun, S. and Meeso, N. 2012. Effect of drying methods on volatile compounds, fatty acids and antioxidant property of Thai kaffir lime (*Citrus hystrix* D.C.). **International Journal of Food Science & Technology**. 47: 603-612.

Smyth, H. E., Sanderson, J. E. and Sultanbawa, Y. 2012. Lexicon for the sensory description of Australian native plant foods and ingredients. **Journal of Sensory Studies**. 27: 471-481.

Tasirin, S. M., Puspasari, I., Lun, A. W., Chai, P. V. and Lee, W. T. 2014. Drying of kaffir lime leaves in a fluidized bed dryer with inert particles: Kinetics and quality determination. **Industrial Crops and Products**. 61: 193-201.

Xiao, Z., Ma, S., Niu, Y., Chen, F. and Yu, D. 2015. Characterization of odour-active compounds of sweet orange essential oils of different regions by gas chromatography-mass spectrometry, gas chromatography-olfactometry and their correlation with sensory attributes. **Flavour and Fragrance Journal**. 31: 41-50.

ผลของการสกัดด้วยเอนไซม์ต่อคุณภาพของโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าว
Effect of Enzymatic Extraction on Quality of Rice Bran Protein Hydrolysate

ณัฏฐกานต์ จันทะวัง[1] กมลวรรณ แจ้งชัด[1*] ลัดดา แสงเดือน วัฒนศิริธรรม[2] และ อนุวัตร แจ้งชัด[1]
Natthakarn Janthawang[1], Kamolwan Jangchud[1*], Ladda Sangduean Wattanasiritham[2] and Anuvat Jangchud[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดของเอนไซม์ และระยะเวลาในการสกัดต่อคุณภาพ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าว วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยศึกษาการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (การย่อย และไม่ย่อยด้วย Fungamyl) ร่วมกับการย่อยด้วยเอนไซม์โปรติเอส (Protamex และ Alcalase) และระยะเวลาย่อย (2, 4 และ 6 ชั่วโมง) และตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ย่อยด้วยเอนไซม์ จากการศึกษา พบว่า การย่อยรำข้าวด้วยเอนไซม์ Alcalase มีผลทำให้ปริมาณโปรตีนผลผลิตที่ได้ และผลผลิตโปรตีนมากกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์ Protamex ที่ระยะเวลาการย่อยเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) การย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลส ไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณโปรตีนในสารสกัด แต่ทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้ และน้ำตาลรีดิวซิงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาในการย่อยไม่มีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถต้านอนุมูลอิสระ 2,2-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline)-6-sulfonic acid (ABTS) ของโปรตีนไฮโดรไลเสท ($p\leq0.05$) จากการศึกษา พบว่า สภาวะการย่อยโปรตีนที่เหมาะสม คือ การย่อยด้วยเอนไซม์ Alcalase นาน 2 ชั่วโมง ได้ปริมาณโปรตีนร้อยละ 31.31 ปริมาณผลผลิตโปรตีนร้อยละ 52.68 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 16.53 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อสารสกัด 1 กรัม ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS 9.03 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อสารสกัด 1 กรัม และความสามารถในการรีดิวซ์เฟอริก (Ferric reducing antioxidant power, FRAP)119.84 มิลลิโมลาร์สมมูลย์ของเฟอรัสซัลเฟตต่อสารสกัด 1 กรัม (mM $FeSO_4$/g of extract)

ABSTRACT

The objective of this research was to study effect of enzyme type and extraction time on quality and antioxidant activity of rice bran protein hydrolysate. The completely randomized design was used to study the hydrolysis by α-amylase (hydrolyze or unhydrolyze by Fungamyl) combined with protease (Alcalase and Protamex) and extraction time (2, 4 and 6 h). A control was prepared using same condition with inactivated Alcalase. The results showed that hydrolysate extracted by Alcalase gave higher protein content, yield and protein yield than hydrolysate extracted by Protamex at the same extraction time ($p\leq0.05$). Amylase had no effect on protein content but increased yield and reducing sugar of crude extract. The extraction time had no effect on total phenolic content and ABTS radical scavenging activity of rice bran protein hydrolysate. The optimal condition of extract rice bran protein hydrolysate was using an Alcalase for 2 hours. This condition produced protein content of 31.31%, protein yield of 52.68%, Total phenolic compound of 16.53 mg gallic acid equivalents (GAE)/g of extract, ABTS of 9.03 mg GAE/g of extract and FRAP of 119.84 mM $FeSO_4$/g of extract.

Key Words: defatted rice bran, enzymatic method, rice barn protein hydrolysate, antioxidant activity

* 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

[2] สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2] Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

รำข้าวเป็นส่วนประกอบชั้นนอกของข้าวกล้อง และเป็นผลผลิตพลอยได้หลังจากกระบวนการสีข้าว (Cheruvanky, 2003) มีปริมาณประมาณร้อยละ 10 ของข้าวกล้องก่อนขัดสี ซึ่งประกอบด้วยเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด ชั้นเยื่อโปร่งใส ชั้นแอลิวโรนหรือเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ด และคัพภะ และรำข้าวสกัดไขมันเป็นผลพลอยได้จากการสกัดน้ำมัน ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูก นิยมในไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ แต่ประกอบไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ และเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยโปรตีนที่มีคุณภาพ ซึ่งในรำข้าวที่ผ่านการสกัดไขมันมีโปรตีนประมาณร้อยละ 15-20 (Ali *et al.,* 2010) จึงมีการนำรำข้าวมาสกัดโปรตีน เพื่อช่วยเพิ่มมูลค่ารำข้าวสำหรับอาหารในอุตสาหกรรม (Hamada, 2000) โดยการสกัดด้วยสารละลายด่าง และการใช้เอนไซม์โปรติเอส ในการสกัดโปรตีน เช่น Alcalase, Protamex, Flavourzyme, Trypsin และ Papain เป็นต้น (Hanmoungjai *et al.,* 2002; Zhao *et al.,*2012) การใช้เอนไซม์โปรติเอสจะช่วยเพิ่มปริมาณโปรตีนในการสกัด เนื่องจากสามารถไฮโดรไลซ์พันธะเปปไทด์ในโมเลกุลของโปรตีน ให้เป็นเปปไทด์สายสั้นๆ และกรดอะมิโนบางชนิด ทำให้โปรตีนสามารถละลายออกมาได้มากขึ้น นอกจากนี้เปปไทด์สายสั้น และกรดอะมิโนบางชนิด ยังมีความสามารถต้านอนุมูลอิสระ (Tang *et al.,* 2002; Zhang *et al*., 2014) แต่เนื่องจากโมเลกุลโปรตีนในรำข้าวมีพันธะเชื่อมกับสตาร์ชแกลนูล และพอลิแซคคาไรด์ชนิดอื่น เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและไซโลส เป็นต้น (Tang *et al.,* 2002) จึงมีการใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคไซด์ภายในสายพอลิเมอร์ของโมเลกุลแป้งและไกลโคเจนที่ตำแหน่งแอลฟา 1,4 แบบสุ่ม เมื่อไฮโดรไลซ์จะได้น้ำตาล เช่น น้ำตาลมอลโทส และน้ำตาลกลูโคส (Cheetangdee, 2014) จากงานวิจัยของ Tang *et al.* (2003) พบว่า การใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสย่อยรำข้าวสกัดไขมันได้ปริมาณโปรตีนสูงสุดร้อยละ 45.4 เมื่อเทียบกับเอนไซม์วิสโคไซม์ และเซลลูเคลส การย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส จึงอาจเป็นวิธีหนึ่งที่จะเพิ่มปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในโปรตีนไฮโดรไลเสท ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (Fungamyl® 2500 SG) ร่วมกับเอนไซม์โปรติเอส (Protamex® และ Alcalase® 2.4L) และระยะเวลาในการสกัดต่อคุณภาพ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าว

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมและตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบ

รำข้าวที่ผ่านการสกัดไขมันที่มีปริมาณไขมัน ไม่เกินร้อยละ 2 ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมส บรรจุในถุงพลาสติกแบบสุญญากาศ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ตามวิธีการของ AOAC (2012)

2. การศึกษาสภาวะและเอนไซม์ในการสกัดโปรตีนไฮโดรไลเสท

ศึกษาสภาวะ และเอนไซม์ในการสกัดโปรตีนไฮโดรไลเสท โดยการวางแผนการทดลองสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) มีปัจจัยแรก คือ การย่อย และไม่ย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลส (Fungamyl® 2500 SG, 2500 FAU/g) ปัจจัยที่สอง คือ การย่อยด้วยเอนไซม์โปรติเอส 2 ชนิด คือ Protamex® (1.5 AU/g) และ Alcalase® 2.4L (2.4 AU/g) และปัจจัยที่สาม คือ ระยะเวลาย่อย 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และมีตัวอย่างควบคุมที่ใช้เอนไซม์ Alcalase® 2.4L ที่ถูกยับยั้งการทำงานย่อยเป็นเวลา 0, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

เตรียมโดยนำรำข้าวสกัดไขมัน 100 กรัมผสมน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ปรับ pH เป็น 6.2 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัล สำหรับวิธีการย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลส (Fungamyl) ใช้ปริมาณของเอนไซม์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของรำข้าวเริ่มต้น (กรัม) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ดัดแปลงจากวิธีของ Alrahmany and Tsopmo (2012) จึงยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยให้ความร้อนอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที

จากนั้นย่อยด้วยเอนไซม์โปรติเอส โดยปรับ pH 7.0 สำหรับเอนไซม์ Protamex และ pH 8.0 สำหรับเอนไซม์ Alcalase ดัดแปลงจากวิธีของ Hamada (2000) และ Zhao *et al.* (2012) โดยใช้ปริมาณของเอนไซม์ร้อยละ 1 E/S ของน้ำหนักโปรตีนในรำข้าวเริ่มต้น (กรัม) ใช้ระยะเวลาในการย่อย 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จึงยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยให้ความร้อนอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที จากนั้นหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 4,000 rpm ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วเก็บสารละลายส่วนบนไว้ ล้างตะกอนรำข้าวด้วยน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร และหมุนเหวี่ยงอีก 1 รอบ นำสารละลายโปรตีนทั้งหมดที่ได้กรองด้วยกระดาษกรอง whatman® เบอร์ 1 จากนั้นปรับ pH ของสารละลายโปรตีนเป็น 7.0 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 นอร์มัล นำสารละลายโปรตีนสกัดที่ได้ไประเหยด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุน และทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze dry) และเก็บรักษาโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าว ในถุงโพลิเอทีลีนที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

2.1. การวิเคราะห์คุณภาพของโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าว

2.1.1. ปริมาณความชื้น โปรตีน และน้ำตาลรีดิวซ์ ตาม AOAC (2012)

2.1.2. ปริมาณผลผลิตที่ได้ % yield = $\frac{\text{น้ำหนักโปรตีนไฮโดรไลเสทหลังทำแห้ง(กรัม)}}{\text{น้ำหนักรำข้าวเริ่มต้นในการสกัด (กรัม)}} \times 100$

2.1.3. ปริมาณผลผลิตโปรตีน ตามวิธีของ Wang et al. (1999)

$$\%\ \text{protein yield} = \frac{(\text{น้ำหนักโปรตีนไฮโดรไลเสท (กรัม)} \times \text{ปริมาณโปรตีนของโปรตีนไฮโดรไลเสท (ร้อยละ)})}{(\text{น้ำหนักรำข้าว (กรัม)} \times \text{ปริมาณโปรตีนของรำข้าว (ร้อยละ)})} \times 100$$

2.1.4. ระดับของการย่อยสลาย (Degree of hydrolysis: DH) ตามวิธีของ Adler-Nissen (1986)

2.2. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ดัดแปลงวิธีของ Boateng *et al*. (2008) เตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 7 ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent (เจือจาง 1:10) 1 มิลลิลิตร ผสมลงในหลอดทดลองที่มีสารละลายไฮโดรไลเสท (ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) 1 มิลลิลิตร เขย่าผสมให้เข้ากันและบ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer (ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 160A) โดยนำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิก และรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม (mg GAE/g of extract)

2.3. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

วิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี ABTS radical scavenging activity ดัดแปลงวิธีของ Re *et al*. (1999) เตรียมสารละลาย ABTS (2, 2'-azino-bis (3- ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2O_8S_2$) ความเข้มข้น 2.45 มิลลิโมลาร์ ในอัตราส่วน 1:0.5 แล้วเก็บในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้งานทำการเจือจางสารละลาย ABTS ด้วย phosphate buffer saline pH 7.4 เพื่อให้ค่าดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 0.70±0.02 ที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer จากนั้นผสมสารละลายเจือจาง ABTS ปริมาตร 2 มิลลิลิตรทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรไลเสท ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและบ่มในที่มืดไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 นาที จึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร คำนวณความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS (ร้อยละ) ตามสมการ

$$\text{ABTS radical scavenging activity (\%)} = ((A_{control}-A_{sample}) \times 100)/A_{control}$$

เมื่อ $A_{control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างควบคุม (สารละลายเจือจาง ABTS และน้ำกลั่น)

A_{sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างและสารละลายเจือจาง ABTS

วิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอริก โดยวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP) ดัดแปลงวิธีของ Chanput *et al*. (2009) เตรียมสารละลาย FRAP reagent โดยผสม acetate buffer (pH 3.6) ความเข้มข้น 300 มิลลิโมลาร์ : TPTZ (2,4,6-Tris(2-pyridyl)-1,3,5-triazine) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ : เฟอริกคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ในอัตราส่วน 10:1:1 จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีก่อนการใช้งาน จากนั้นปิเปตสารละลายไฮโดรไลเสทจากรำข้าว ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ทำปฏิกิริยากับ FRAP reagent ปริมาตร 3 มิลลิลิตร จากนั้นบ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที และนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร รายงานผลความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ FRAP ในหน่วยมิลลิโมลาร์สมมูลย์มิลลิโมลาร์ของเฟอรัสซัลเฟตต่อน้ำหนักตัวอย่างสารสกัดโปรตีนรำข้าว (mM $FeSO_4$/g of extract)

3. สถิติที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผล

สำหรับการวิเคราะห์ค่าคุณภาพทางด้านเคมี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และการวิเคราะห์ความสามารถต้านอนุมูลอิสระ รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows Ver.12.0 (SPSS Inc., Thailand)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. องค์ประกอบของวัตถุดิบ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของรำข้าวสกัดน้ำมัน พบว่า มีปริมาณความชื้นร้อยละ 2.83 โดยน้ำหนักเปียก ปริมาณไขมัน เส้นใยหยาบ โปรตีน เถ้า และคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 1.02, 8.25, 22.63, 13.46 และ 54.64 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

2. ผลของการย่อยด้วยเอนไซม์ต่อคุณภาพของโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าว

2.1. การวิเคราะห์คุณภาพของโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าว

การย่อยโปรตีนด้วยเอนไซม์โปรติเอส (Protamex และ Alcalase) ทำให้ปริมาณโปรตีน ผลผลิตที่ได้ และผลผลิตโปรตีนเพิ่มขึ้น (Table 1) เมื่อเทียบกับการย่อยโดยไม่ใช้เอนไซม์ ซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุม เนื่องจากเอนไซม์โปรติเอส สามารถไฮโดรไลซ์พันธะเปปไทด์ในโมเลกุลของโปรตีน ทำให้เปปไทด์ที่มีความสามารถในการละลายออกมาจากรำข้าวสกัดไขมันได้มากขึ้น (Hamada, 1999)

จากการย่อยด้วยเอนไซม์โปรติเอสต่างชนิดกัน พบว่า การย่อยด้วยเอนไซม์ Alcalase มีปริมาณโปรตีน (ร้อยละ 31.31-33.60) ผลผลิตที่ได้ (ร้อยละ 38.07-39.64) และผลผลิตโปรตีน (ร้อยละ 52.68-58.86) มากกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์ Protamex ที่สภาวะเวลาการย่อยเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการปรับค่า pH สำหรับการย่อย โดยเอนไซม์ Alcalase ใช้สภาวะการย่อยเป็นเบส (pH 8.0) ซึ่งโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำจะสามารถละลายออกมาได้มากกว่า (Shih *et al.,* 1999) นอกจากนี้เอนไซม์ Alcalase มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์ (enzyme activity) คือ 2.4 AU/g ซึ่งมีค่ามากกว่าเอนไซม์ Protamex (1.5 AU/g) จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยได้ดีกว่า แสดงใน Figure 1 ดังนั้นจึงละลายโปรตีนที่อยู่ในรำข้าวมากกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์ Protamex และทำให้มีผลผลิตที่ได้เพิ่มขึ้นด้วย

Table 1 Effect of enzymatic methods and time on protein extraction from defatted rice bran.

Treatment	moisture content (%wb)	protein content (%db)	yield (%db)	protein yield (%db)	reducing sugar (%db)
C0	4.38 ± 0.87^{bc}	10.92 ± 0.29^{g}	25.30 ± 0.72^{h}	12.20 ± 0.35^{j}	3.21 ± 0.08^{e}
C2	4.51 ± 1.36^{bc}	10.98 ± 0.51^{g}	27.81 ± 1.32^{g}	13.49 ± 0.64^{j}	3.23 ± 0.13^{e}
C4	4.25 ± 0.91^{bc}	10.67 ± 0.66^{g}	28.23 ± 0.85^{g}	13.31 ± 0.40^{j}	3.77 ± 0.02^{de}
C6	4.13 ± 0.61^{bc}	10.42 ± 0.17^{g}	28.61 ± 0.22^{g}	13.17 ± 0.10^{j}	4.37 ± 0.11^{cd}
P2	1.64 ± 0.09^{d}	17.88 ± 0.26^{de}	32.55 ± 0.17^{e}	25.72 ± 0.13^{h}	2.98 ± 0.32^{e}
P4	2.70 ± 2.08^{cd}	19.58 ± 0.64^{cd}	31.09 ± 0.09^{f}	26.90 ± 0.07^{gh}	3.22 ± 0.09^{e}
P6	1.53 ± 0.15^{d}	21.53 ± 0.10^{c}	30.30 ± 0.07^{f}	28.83 ± 0.07^{f}	3.62 ± 0.15^{de}
A2	1.56 ± 0.12^{d}	31.31 ± 0.01^{a}	38.07 ± 0.59^{d}	52.68 ± 0.81^{d}	3.50 ± 0.60^{de}
A4	1.49 ± 0.20^{d}	32.85 ± 0.22^{a}	38.06 ± 0.28^{d}	55.25 ± 0.41^{c}	5.11 ± 0.57^{c}
A6	2.65 ± 1.03^{cd}	33.60 ± 0.38^{a}	39.64 ± 0.83^{c}	58.86 ± 1.23^{b}	5.14 ± 0.11^{c}
FP2	4.17 ± 0.44^{bc}	14.43 ± 3.48^{f}	37.93 ± 0.51^{d}	24.19 ± 0.32^{i}	20.06 ± 1.02^{a}
FP4	5.39 ± 1.34^{b}	16.67 ± 0.71^{ef}	38.19 ± 0.25^{cd}	28.13 ± 0.18^{fg}	20.33 ± 0.36^{a}
FP6	6.16 ± 0.64^{b}	18.74 ± 2.05^{de}	39.30 ± 1.27^{cd}	32.55 ± 1.05^{e}	19.83 ± 0.06^{a}
FA2	5.79 ± 0.39^{b}	27.20 ± 0.11^{b}	44.80 ± 0.66^{b}	53.84 ± 0.79^{d}	18.19 ± 0.28^{b}
FA4	6.05 ± 0.11^{b}	28.32 ± 0.65^{b}	47.40 ± 0.46^{a}	59.32 ± 0.57^{ab}	18.22 ± 0.44^{b}
FA6	8.40 ± 1.84^{a}	28.48 ± 0.26^{b}	48.04 ± 0.48^{a}	60.45 ± 0.61^{a}	18.85 ± 0.86^{b}

Note $^{a\text{-}j}$ means with different letters within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

C=Control, P=Protamex. A=Alcalase, FP=Fungamyl+Protamex and FA=Fungamyl+Alcalase.

0-6 means extraction time with Protamex or Alcalase.

ส่วนการย่อยด้วยเอนไซม์ Fungamyl ก่อนการย่อยด้วยเอนไซม์โปรติเอส พบว่า ค่าปริมาณโปรตีนของโปรตีนไฮโดรไลเสทลดลง แต่ผลผลิตที่ได้ ผลผลิตโปรตีน และปริมาณน้ำตาลรีดิวซิงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการย่อยด้วยเอนไซม์โปรติเอสเพียงอย่างเดียวที่แต่ละระดับเวลาการย่อย เนื่องจากการย่อยด้วย Fungamyl ซึ่งเป็นเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส จึงสามารถย่อยคาร์โบไฮเดรตในรำข้าวให้เป็นน้ำตาลรีดิวซิงละลายออกมาอยู่ในสารละลายโปรตีนไฮโดรไลเสท ทำให้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซิงเพิ่มขึ้น (Hanmoungjai *et al.*, 2002; Alrahmany and Tsopmo. 2012) ส่งผลให้ร้อยละของโปรตีนในโปรตีนไฮโดรไลเสทลดลง ขณะที่ผลผลิตที่ได้เพิ่มขึ้น และพบว่า ระยะเวลาในการย่อยที่ศึกษานี้ มีผลต่อคุณภาพของโปรตีนไฮโดรไลเสทน้อยกว่าชนิดของเอนไซม์ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระยะเวลาการย่อย พบว่า ปริมาณโปรตีน ผลผลิตที่ได้ ผลผลิตโปรตีน และปริมาณน้ำตาลรีดิวซิงมีแนวโน้มสูงขึ้น

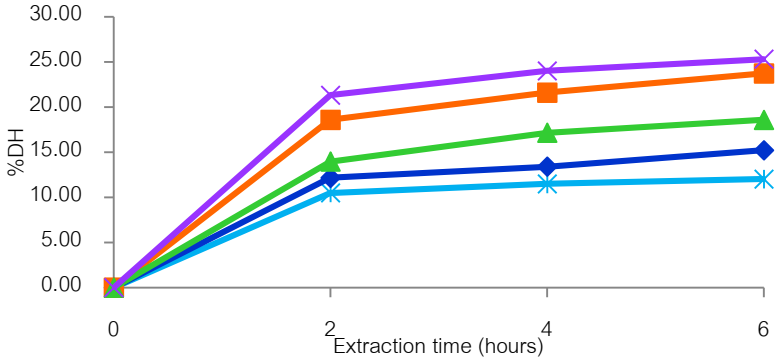


Figure 1 Degree of hydrolysis of Control (✳) Protamex (◆) Alcalase (■) Fungamyl+Protamex (▲) and Fungamyl+Alcalase (✕) during 6 hours at 50°C

ระดับของการย่อยสลาย (Degree of hydrolysis: DH) แสดงถึงประสิทธิภาพของการย่อยโปรตีนด้วยเอนไซม์ ซึ่งพันธะเปปไทด์ของโปรตีนในรำข้าว ถูกไฮโดรไลซ์ให้เป็นเปปไทด์สายสั้นๆ และกรดอะมิโน (Jarunrattanasri *et al.*, 2007; Kong and Xiong, 2006; Thamnarathip *et al.*, 2016) จากการศึกษา พบว่าเอนไซม์ Alcalase มีระดับของการย่อยสลายมากกว่าเอนไซม์ Protamex ที่สภาวะในการย่อยเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงใน Figure 1 และเมื่อระยะเวลาในการย่อยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระดับของการย่อยสลายเพิ่มขึ้น

2.2. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ผลของปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดจากโปรตีนไฮโดรไลเสทคำนวณจากกราฟมาตราฐานกรดแกลลิก ($y=18.057x+0.0467$, $R^2=0.9991$) พบว่า ชนิดของเอนไซม์โปรติเอสมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาในการสกัดโปรตีนไฮโดรไลเสท โดยโปรตีนไฮโดรไลเสทจากการย่อยด้วยเอนไซม์ Alcalase ให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากกว่าที่ย่อยด้วยเอนไซม์ Protamex และตัวอย่างควบคุม แสดงใน Table 2 ทั้งนี้พบว่า เมื่อมีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูง มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีค่าสูงด้วย เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกมีหมู่ไฮดรอกซิลบนวงแหวนเบนซินที่ให้โปรตอน และความจำเพาะของเอนไซม์ที่อาจทำลาย

สารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีนและพอลีฟีนอล ให้เป็นสารประกอบฟีนอลหรือเปปไทด์ที่มีกลุ่มฟีนอลชนิดอื่น เช่น ไทโรซีน เป็นต้น (Adebiyi *et al.,* 2009)

Table 2 Total phenolic compound and antioxidant activity of rice bran protein hydrolysate

Treatment	Total phenolic compound (mg GAE/g of extract)	ABTS (mg GAE/g of extract)	FRAP (mM $FeSO_4$/g of extract)
C0	11.53±0.24^{f}	5.79±0.06^{b}	143.99±0.42^{a}
C2	11.70±0.45^{f}	5.87±0.04^{b}	148.68±1.41^{a}
C4	11.65±0.27^{f}	5.86±0.02^{b}	148.57±1.55^{a}
C6	11.59±0.32^{f}	5.57±0.93^{b}	143.57±0.35^{a}
P2	10.93±0.13^{g}	5.21±0.07^{b}	100.91±2.81^{d}
P4	13.58±0.15^{d}	6.25±0.40^{b}	115.67±1.11^{bc}
P6	12.50±0.03^{e}	6.36±0.31^{b}	115.89±1.16^{bc}
A2	16.53±0.01^{a}	9.03±0.49^{a}	119.84±1.09^{b}
A4	15.95±0.11^{bc}	8.53±0.67^{a}	114.97±0.21^{bc}
A6	16.58±0.20^{a}	9.61±0.02^{a}	110.62±4.57^{c}
FP2	11.63±0.37^{f}	5.58±0.76^{b}	102.14±1.26^{d}
FP4	11.49±0.30^{f}	6.41±0.09^{b}	100.13±3.99^{d}
FP6	12.83±0.09^{e}	6.61±0.01^{b}	101.00±4.52^{d}
FA2	15.48±0.16^{c}	8.73±0.52^{a}	113.85±0.07^{bc}
FA4	15.80±0.17^{bc}	8.07±0.86^{a}	113.20±1.00^{bc}
FA6	16.21±0.09^{ab}	9.65±0.20^{a}	110.91±11.32^{c}

Note $^{a-j}$ means with different letters within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

C=Control, P=Protamex. A=Alcalase, FP=Fungamyl+Protamex and FA=Fungamyl+Alcalase.

0-6 means extraction time with Protamex or Alcalase.

2.3. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

จากการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี ABTS และ FRAP (Table 2) พบว่าโปรตีนไฮโดรไลเสทจากการย่อยด้วยเอนไซม์ Alcalase มีความสามารถต้านอนุมูลอิสระมากกว่าเอนไซม์ Protamex ที่ระยะเวลาการย่อยเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และระยะเวลาในการย่อยของเอนไซม์โปรติเอสทั้งสองชนิดไม่มีผลต่อค่า ABTS ($p > 0.05$) แต่ระยะเวลาในการย่อยมีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ FRAP ของโปรตีนไฮโดรไลเสทที่ได้จากการย่อย Protamex และ Alcalase ($p \leq 0.05$) โปรตีนไฮโดรไลเสทจากการย่อยด้วย Protamex และตัวอย่างที่ไม่ใช้เอนไซม์มีค่า ABTS ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และ ABTS มีแนวโน้มสัมพันธ์ไปทิศทางเดียวกับการทดสอบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด การย่อยด้วยเอนไซม์โปรติเอสจะมีค่า FRAP น้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้เอนไซม์ (143.57-

143.99 mM $FeSO_4$/g of extract) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Thamnarathip *et al.* (2016) ศึกษาปริมาณ FRAP ในโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าว และงานวิจัยของ Bamdad *et al*. (2011) ศึกษาปริมาณ FRAP ในโปรตีนไฮโดรไลเสทจากข้าวบาร์เลย์ พบว่า น้ำหนักโมเลกุลของเปปไทด์สูง จะมีความสามารถต้านอนุมูลอิสระ FRAP สูง

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าวในงานวิจัยนี้คือ การย่อยด้วยเอนไซม์ Alcalase นาน 2 ชั่วโมง เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด และระยะเวลาในการย่อยด้วยเอนไซม์ Alcalase ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีน และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ระยะเวลาในการย่อยที่ศึกษานี้ มีผลต่อคุณภาพของโปรตีนไฮโดรไลเสทน้อยกว่าชนิดของเอนไซม์

สรุป

การย่อยรำข้าวด้วยเอนไซม์ Alcalase มีผลต่อปริมาณโปรตีน ผลผลิตที่ได้ และผลผลิตโปรตีน มากกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์ Protamex ที่ระยะเวลาการย่อยเดียวกัน ($p \leq 0.05$) การย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลสก่อนเอนไซม์โปรติเอสทั้งสองชนิด ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตที่ได้ และปริมาณน้ำตาลรีดิวซิงเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณโปรตีนในสารสกัด และระยะเวลาในการย่อยมีผลต่อปริมาณผลผลิตโปรตีนของโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าว ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดโปรตีนไฮโดรไลเสทจากรำข้าวในงานวิจัยนี้คือ การย่อยด้วยเอนไซม์ Alcalase นาน 2 ชั่วโมง เนื่องจากมีปริมาณโปรตีน ผลผลิตที่ได้ และผลผลิตโปรตีน ร้อยละ 31.31, 38.07 และ 52.68 ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

Adebiyi, A. P., A. O. Adebiyi, J. Yamashita, T. Ogawa and K. Muramoto. 2009. Purification and characterization of antioxidative peptides derived from rice bran protein hydrolysates. **European Food Research and Technology** 228: 553–563.

Adler-Nissen, J. 1986. **Enzymic hydrolysis of food proteins**. Elsevier applied science publishers, New York.

Ali, R., F.F Shih and M.N. Riaz. 2010. Processing and functionality of rice bran proteins and peptides. Antioxidant peptides. In Mine, Y., E. Li-Chan and B. Jiang. (eds.), **Bioactive Proteins and Peptides as Functional Foods and Nutraceuticals**. Wiley-Blackwell, Iowa, pp. 233-246.

Alrahmany, R. and A. Tsopmo. 2012. Role of carbohydrases on the release of reducing sugar, total phenolics and on antioxidant properties of oat bran. **Food Chemistry** 132(1): 413–418.

A.O.A.C. 2012. **Official Methods of Analysis of AOAC international.** 19th ed. Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, Maryland, USA.

Bamdad, F., J. Wu and L. Chen. 2011. Effects of enzymatic hydrolysis on molecular structure and antioxidant activity of barley hordein. **Journal of Cereal Science** 54(1): 20-28.

Boateng, J., M. Verghese, L.T. Walker and S. Ogutu. 2008. Effect of processing on antioxidant contents in selected dry beans (Phaseolus spp. L.). **LWT - Food Science and Technology** 41(9): 1541-1547.

Chanput, W., C. Theerakulkait and S. Nakai. 2009. Antioxidative properties of partially purified barley hordein, rice bran protein fractions and their hydrolysates. **Journal of Cereal Science** 49(3): 422-428.

Cheetangdee, N. 2014. Effects of rice bran protein hydrolysates on the physicochemical stability of oil-in-water emulsions. **Journal of oleo science** 63(12): 1231-1241.

Cheruvanky, R. 2003. Phytochemical products: rice bran, pp. 347-376. In I. Johnson and G. Williamson, eds. **Phytochemical functional foods.** CRC Press, Boca Raton.

Hamada, J. 1999. Use of protease to enhance solubilization of rice bran proteins. **Journal of Food Biochemistry** 23(3): 307-321.

Hamada, J.S. 2000. Characterization and functional properties of rice bran proteins modified by commercial exoproteases and endoproteases. **Journal of Food Science** 65(2): 305-310.

Hanmoungjai, P., D.L. Pyle and K. Niranjan. 2002. Enzyme-assisted water-extraction of oil and protein from rice bran. **Journal of chemical technology and biotechnology** 77(7): 771-776.

Jarunrattanasri, A., C. Theerakulkait and K.R. Cadwallader. 2007. Aroma components of acid-hydrolyzed vegetable protein made by partial hydrolysis of rice bran protein. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 55(8): 3044-3050.

Kong, B. and Y.L. Xiong. 2006. Antioxidant activity of zein hydrolysates in a liposome system and the possible mode of action. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 54(16): 6059-6068.

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 Biology and Medicine** 26(9–10): 1231-1237.

Shih, F. F., E. T. Champagne, K. Daigle and Z. Zarins. 1999. Use of enzymes in the processing of protein products from rice bran and rice flour. **Nahrung** 43(1): 14-18.

Tang, S., N. S. Hettiarachchy. and T. H. Shellhammer. 2002. Protein extraction from heat-stabilized defatted rice bran. 1. physical processing and enzyme treatments. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 50(25): 7444-7448.

Tang, S., N.S. Hettiarachchy, S. Eswaranandam and P. Crandall. 2003. Protein extraction from heat-stabilized defatted rice bran: II the role of amylase, celluclast and viscozyme. **Journal of Food Science** 68(2): 471-475.

Thamnarathip, P., K. Jangchud, S. Nitisinprasert and B. Vardhanabhuti. 2016. Identification of peptide molecular weight from rice bran protein hydrolysate with high antioxidant activity. **Journal of Cereal Science** 69: 329-335.

Wang, M., N. S. Hettiarachchy, M. Qi, W. Burksand T. Siebenmorgen. 1999. Preparation and functional properties of rice bran protein isolate. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 47(2): 411-416.

Zhang, H. J., J. Wang, B. H. Zhang and H. Zhang. 2014. Antioxidant activities of the fractionated protein hydrolysates from heat stable defatted rice bran. **International Journal of Food Science and Technology** 49(5): 1330-1336.

Zhao, Q., H. Xiong, C. Selomulya, X.D. Chen, H. Zhong, S. Wang, W. Sun and Q. Zhou. 2012. Enzymatic hydrolysis of rice dreg protein: Effects of enzyme type on the functional properties and antioxidant activities of recovered proteins. **Food Chemistry** 134(3): 1360-1367.

การพัฒนากระดาษกรองน้ำมันพืชจากฟางข้าว

Development of Vegetable Oil Filtering Paper from Rice Straw

วุฒินันท์ คงทัด[1] สุธีรา วิทยากาญจน์[1] ชัยพร สามพุ่มพวง[1] จิรชยา บุญญฤทธิ์ และ รังสิมา ชลคุป[1*]

Wuttinant Kongtud[1], Suteera Witayakran[1], Chaiyaporn Sampoompuang[1], Jirachaya Boonyarit[1] and Rungsima Chollakup[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระดาษพิเศษจากฟางข้าว ให้สามารถใช้กรองแยกน้ำมันพืชที่เกิดจากกระบวนการผลิตและมีคุณภาพได้มาตรฐาน โดยใช้ฟางข้าวคละพันธุ์และเปลือกปอสาเกรด A เป็นวัตถุดิบ สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อคือ การต้มฟางข้าวและเยื่อปอสาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 และ 12 โดยน้ำหนักแห้งของวัตถุดิบ ตามลำดับ ต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ได้เยื่อฟางข้าวและ เยื่อปอสาเฉลี่ยร้อยละ 29.58 และ 56.71 ตามลำดับ ฟอกเยื่อฟางข้าวและเยื่อปอสาด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละ 15 และ 7 ตามลำดับ วัดความขาวสว่างได้เฉลี่ยร้อยละ 70.51 และ 70.49 ตามลำดับ อัตราส่วนการผสมเยื่อฟางข้าวต่อเยื่อปอสาที่เหมาะสมคือ 70:30 น้ำหนักมาตรฐาน 85±5 กรัมต่อตารางเมตร เคลือบด้วยสารละลายไคโตซานร้อยละ 0.6 โดยปริมาตร กระดาษที่ได้มีความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 8.29 เถ้าเฉลี่ย 4.96 ความเรียบเฉลี่ย 10.45 วินาที ซับน้ำมันเฉลี่ยร้อยละ 240 และซับน้ำเฉลี่ยร้อยละ 200 ของน้ำหนักกระดาษแห้ง อัตราการไหลผ่านกระดาษกรองของน้ำมันพืชเฉลี่ย 0.40 มิลลิลิตรต่อนาที มีคุณภาพที่ได้มาตรฐาน ปลอดภัยต่อผู้บริโภคและมีต้นทุนต่ำสามารถผลิตจำหน่ายได้

ABSTRACT

This research aims to develop a specialty paper from rice straw that can be used as filter paper for vegetable oil obtained from production process to meet the quality standards. Mixed varieties of rice straw and paper mulberry bark (grade A) were used as raw material in this study.The optimal process obtained from this research can be summarized as follows. In pulping process, rice straw and paper mulberry bark were treated at 100 °C for 3 hours using 30% and 12% NaOH (% by o.d. weight of raw material), respectively. Pulp yield of rice straw and paper mulberry were 29.58% and 56.71%, respectively. In bleaching stage, rice straw and paper mulberry pulps were bleached with 15% and 7% H_2O_2, respectively. The brightness was 70.51% and 70.49%, respectively. In paper forming, the optimal mixing ratio of rice straw pulp to paper mulberry pulp was 70 to 30. Basis weight of the paper was 85±5 g/m^2. After that, the paper was coated with 0.6% w/v chitosan solution. The moisture content, ash content, and smoothness of the coated paper were 8.29%, 4.96%, and 10.45 seconds, respectively. The developed paper can absorb oil and water at 240% and 200% (% by o.d. weight of the paper), respectively. The flow rate of oil through the filter paper was 0.40 ml/min. The specialty papers from rice straw meet the quality standards and safe for consumer uses. The production cost was low which can be produced for commercial purpose.

Key Words: rice straw, filter paper, vegetable oil, chitosan, SEM

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

[1]สถาบันผลิตผลเกษตรฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]KAPI, Kasetsart University Bangkok 10900

คำนำ

ในบรรดาน้ำมันพืชทั้งหลายที่ใช้กันอยู่ในโลกนี้ ที่มีการผลิตมากที่สุดคือถั่วเหลืองกับน้ำมันปาล์ม ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีศักยภาพสูงมาก เพราะว่าเป็นพืชที่ให้น้ำมันพืชต่อพื้นที่ปลูกสูงที่สุด สำหรับประเทศไทยเองมีการใช้น้ำมันจากปาล์มน้ำมันเป็นหลัก คือร้อยละ 67 การผลิตน้ำมันพืชทำได้หลายวิธี โดยวิธีการสกัดแบบบีบเย็นจะทำให้ได้น้ำมันที่มีคุณภาพดีที่สุด วิธีนี้จะช่วยรักษาคุณภาพของสารอาหาร ในส่วนกระบวนการกรองที่ดีที่สุด คือการกรองด้วยกระดาษกรอง การใช้กระดาษกรองเป็นวิธีแยกของแข็งที่ไม่บริสุทธิ์ออกจากของเหลวหรือสารละลาย หรือเป็นการแยกสารที่เป็นของแข็งที่อยู่ในรูปผลึกหรือตะกอนออกจากของเหลวหรือสารละลายโดยใช้ตัวกรอง เช่น กระดาษกรอง การกรองที่มีประสิทธิภาพดีนั้นขึ้นอยู่กับการเลือกอุปกรณ์การกรองที่เหมาะสมกับลักษณะของตะกอนและใช้เทคนิคที่ถูกต้อง ดังนั้นการเลือกใช้กระดาษกรองที่มีคุณภาพและราคาไม่แพง จะทำให้สามารถผลิตน้ำมันพืชที่สะอาด ไม่มีกากรำเจือปน เก็บไว้นานไม่ตกตะกอน

ฟางข้าว ถือเป็นวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรที่มีปริมาณสูงในประเทศไทย และไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างเป็นระบบ เส้นใยของฟางข้าวมีคุณสมบัติทางกายวิภาคของเซลล์เส้นใยที่มีความยาว 0.4-3.4 มิลลิเมตร ความกว้าง 0.01 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้คุณสมบัติของความเป็นผลึกสูงร้อยละ 40 (Rowel et al., 1997 ; Lim et al., 2001) อีกทั้งเส้นใยสามารถใช้ผลิตกระดาษหัตถกรรมได้ กระดาษฟางข้าวที่ทำด้วยมือแบบไทยที่ใช้พิมพ์สกรีนประกอบด้วยเยื่อฟางข้าวต่อเยื่อปอสาในอัตราส่วน 80 : 20 กระดาษจะมีคุณสมบัติทางเชิงกลตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI และการใช้ผงบุก (Glucomannan) (Ahn and Lee, 1992 ; Bhale et al., 2003*)* และโคโตซาน (Chaobo et al., 2001; Chiu and Stewart, 2012; Chang et al., 2003*)* เคลือบจะทำให้กระดาษมีความแข็งแรง มีสมบัติทนน้ำ และต้านทานน้ำ แต่ยังไม่มีการใช้ในกระดาษกรองน้ำมันพืช

การศึกษาครั้งนี้ มีแนวความคิดที่จะพัฒนากระดาษหัตถกรรมจากฟางข้าวให้มีสมบัติกรองเศษพืชจากน้ำมันที่บีบได้นั้น น่าจะเป็นผลดีต่อการผลิตกระดาษหัตถกรรมของบ้านเราและเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับบริษัทผู้ผลิตน้ำมันพืชด้วย จากการศึกษาทดลองที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัยสามารถใช้กลูโคแมนแนน และไคโตแซนเคลือบกระดาษหัตถกรรมและสามารถใช้กรองเศษพืชที่ปนเปื้อนในน้ำมันได้ ดังนั้นการศึกษาทดลองในครั้งนี้จะประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์และได้องค์ความรู้สำหรับใช้เป็นฐานข้อมูลในการศึกษาวิจัยของผู้ที่สนใจต่อไปในอนาคต และได้กระดาษกรองน้ำมันพืชที่สามารถผลิตจำหน่ายได้ เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับกระดาษฟางข้าวของประเทศได้อีกทางหนึ่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย ฟางข้าวและเปลือกปอสา โดยรับซื้อฟางข้าวอัดก้อนชนิดคละพันธุ์จากตัวแทนจำหน่ายฟางข้าวอัดก้อน นำมาคัดแยกส่วนของต้นข้าว ใบข้าว และรวงออกไป ใช้เฉพาะส่วนที่เป็นเยื่อ ในส่วนของเปลือกปอสาเกรด A มีที่มาจากอำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่ ซึ่งผ่านการคัดแยกส่วนประกอบที่ไม่ใช่เยื่อมาแล้ว

สารละลายไคโตซาน ผงเบอร์ 100 จากห้างหุ้นส่วนจำกัด กฤษฎิ์ณรงค์ และกลูโคแมนแนน จากบริษัท สหชลผลพืช จำกัด

วิธีการทดลอง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการต้มเยื่อและฟอกขาวฟางข้าวและเปลือกปอสา

การวิเคราะห์สัณฐานของเส้นใยฟางข้าวและปอสา ใช้วิธีของ Franklin (1945) แล้วนำตัวอย่างไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ Carl zeiss Axiostar Plus Microscope วัดหาความยาวของเส้นใย ความกว้างของเส้นใย ขนาดของลูเมน และความหนาของผนังเส้นใย นอกจากนี้ยังทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดันทะลุ ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของกระดาษ และความเหมาะสมของเยื่อที่จะใช้ทำกระดาษ นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวและเปลือกปอสาเพื่อดูว่าวัตถุดิบทั้งสองมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเยื่อเพื่อใช้ทำกระดาษมากน้อยเพียงใดโดยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ ตามวิธีของ Anonymous (2002) และ Browning (1967)

หลังจากนั้นทำการเตรียมเยื่อจากฟางข้าวและเปลือกปอสา ภายใต้ระบบเปิด ตามวิธีของวิชัยและคณะ (2545) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มฟางข้าวเท่ากับร้อยละ 15 โดยน้ำหนักแห้ง และในกรณีของการต้มเปลือกปอสา ใช้ความเข้มข้นร้อยละ 7 โดยน้ำหนักแห้ง วิเคราะห์ปริมาณและลักษณะของเยื่อที่สามารถใช้ผลิตกระดาษได้ภายหลังการต้ม หลังจากนั้นฟอกเยื่อฟางข้าวและเยื่อปอสาด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละ 15 และ 7 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ศึกษาหาอัตราส่วนการผสมเยื่อที่เหมาะสม รวมทั้งชนิดและความเข้มข้นของสารที่ใช้เคลือบ

แปรอัตราส่วนเยื่อฟางข้าวต่อเยื่อปอสาที่ได้ในการขึ้นรูปกระดาษเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนักเยื่อแห้ง ทดลองตัวอย่างละ 4 ซ้ำ ขึ้นรูปกระดาษด้วยมือแบบไทย ตามวิธีของวุฒินันท์ (2545) ให้มีน้ำหนักของกระดาษตามมาตรฐานเท่ากับ 85±5 กรัมต่อตารางเมตร ขนาด 35x45 เซนติเมตร ปริมาณเยื่อที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อ 1 แผ่นมีน้ำหนัก 11 กรัม ทดลองเคลือบกระดาษด้วยสารละลายไคโตซาน หรือ กลูโคแมนแนน โดยการใช้แปรงทาบนกระดาษ ตามวิธีของ Ohkawa (1988) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 0.4 0.6 และ 0.8 โดยปริมาตร แล้วทดสอบอัตราการไหลผ่านกระดาษกรองของน้ำมันพืช ในปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เท่ากัน ดูความแตกต่างของเวลาที่น้ำมันพืชหยุดไหล ทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI ประกอบด้วยน้ำหนักมาตรฐานตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T410 om-88 ความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง Schopper tensile tester, (Kumagai Riki Kogyo, Co. Ltd., Japan) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T404 om-92 ความต้านแรงฉีกขาดด้วยเครื่อง Tearing strength tester, (Kumagai Riki Kogyo, Co. Ltd., Japan) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T414 om-98 ความต้านการหักพับด้วยเครื่อง MIT folding endurance tester, (Kumagai Riki Kogyo, Co. Ltd., Japan) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T511 om-94 ความต้านแรงดันทะลุด้วยเครื่อง Mullen bursting strength tester, (Kumagai Riki Kogyo, Co. Ltd., Japan) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T403 om-97 และทดสอบคุณสมบัติด้านเชื้อจุลินทรีย์ของกระดาษที่ได้ คือ จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนเชื้อยีสต์และราตามวิธี AOAC (2000) โดยใช้ตัวอย่างกระดาษกรองของ Whatman no. 185 และกระดาษกรองน้ำมันพืชที่โรงงานใช้ที่อยู่ในปัจจุบัน เป็นกระดาษเปรียบเทียบ

ศึกษาลักษณะสัณฐานของกระดาษฟางข้าวภายหลังการเคลือบด้วยไคโตซาน ภายใต้กล้อง Scanning Electron Microscope: SEM ชนิด (XL Series, XL30, Philips, The Netherlands) ที่ 13 กิโลโวลท์

การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design ตามปัจจัยที่ศึกษา รวบรวมผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ Duncan' new multiple rang test (DMRT) โดยคำนวณหา Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวแปรที่มีผลกระทบที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ศึกษาคุณภาพของกระดาษกรองที่พัฒนาแล้ว

ทดสอบคุณภาพของกระดาษกรองจากฟางข้าวที่ผ่านการพัฒนาแล้วตามมาตรฐานของ TAPPI ประกอบด้วยน้ำหนักมาตรฐานตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T410 om-88 ความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง Schopper tensile tester, (Kumagai Riki Kogyo, Co. Ltd., Japan) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T404 om-92 ความต้านแรงฉีกขาดด้วยเครื่อง Tearing strength tester, (Kumagai Riki Kogyo, Co. Ltd., Japan) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T414 om-98 ความต้านการหักพับด้วยเครื่อง MIT folding endurance tester, (Kumagai Riki Kogyo, Co. Ltd., Japan) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T511 om-94 ความต้านแรงดันทะลุด้วยเครื่อง Mullen bursting strength tester, (Kumagai Riki Kogyo, Co. Ltd., Japan) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T403 om-97

ผลและวิจารณ์

การเตรียมและสมบัติของเส้นใยฟางข้าวและเปลือกปอสา

จากการวัดค่าเส้นใยฟางข้าวและเส้นใยปอสาที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเยื่อเพื่อใช้ทำกระดาษกรองน้ำมันพืช ผลการวัดค่าเส้นใยฟางข้าวและเส้นใยปอสาเกรด A ได้ผลดัง Table 1 จากข้อมูลเส้นใยฟางข้าวมีค่าใกล้เคียงกับรายงานของ Huonog (2001) และ วิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของวัตถุดิบทั้งสองที่จะต้องมีค่า Runkel ratio น้อยกว่า 1 ค่า Flexibility coefficient มากกว่า 0.5 ค่า Slenderness ratio มากกว่า 75 และ ค่า Wall fraction น้อยกว่าร้อยละ 50 จึงจะเหมาะสมที่จะนามาผลิตเยื่อใช้ทำกระดาษ ลักษณะโดยรวมของเส้นใยฟางข้าวและเปลือกปอสาสามารถนำมาผลิตเยื่อเพื่อใช้ทำกระดาษได้โดยเฉพาะการทำกระดาษแบบหัตถกรรม ดังนั้นเส้นใยฟางข้าวเป็นเส้นใยสั้น ส่วนเส้นใยปอสาเป็นเส้นใยยาว การนำมาผสมกันจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษให้ดีขึ้น

จากข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี (Table 2) ที่สำคัญของฟางข้าวจะมีแอลฟาเซลลูโลสร้อยละ 35.49 ลิกนินร้อยละ 16.29 และเถ้าร้อยละ 12.35 ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาทดลองของงานวิจัยอื่น (วิทยา, 2540 ; Ai, 1990) ที่ได้แอลฟาเซลลูโลสร้อยละ 46.30 ลิกนินร้อยละ 21.27 และเถ้าร้อยละ 16.93 และการศึกษาทดลองของ Ai (1991) ฟางข้าวมีปริมาณเซลลูโลสค่อนข้างสูงสามารถใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเยื่อทำกระดาษได้ แต่อาจจะมีปัญหาอยู่บ้างเนื่องจากฟางข้าวมีปริมาณเถ้าค่อนข้างสูง การผลิตเยื่ออาจจะต้องใช้ปริมาณด่างมากขึ้นเนื่องจากฟางข้าวมีสารลิกนินค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับเปลือกในปอแก้วที่มีลิกนินร้อยละ 15.12 ทั้งนี้ฟางข้าวสามารถที่จะนำมาผลิตกระดาษได้เหมือนกับพืชอื่น ๆ ผลจากการศึกษาสภาวะการต้มเยื่อฟางข้าวและเยื่อปอสาด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 30 และ 12 ที่ได้ศึกษาไว้แล้ว (วุฒินันท์ คงทัด และคณะ, 2556) ตามลำดับ ได้เยื่อฟางข้าวและ เยื่อปอสาเฉลี่ยร้อยละ 29.58 และ 56.71 ตามลำดับ ฟอกเยื่อฟางข้าวและเยื่อปอสาด้วยสาร

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละ 15 และ 7 ตามลำดับ ได้ค่าความขาวสว่างของเยื่อฟางข้าวและเยื่อปอสาได้เฉลี่ยร้อยละ 70.51 และ 70.49 ตามลำดับ

Table 1 Fiber morphology and mechanical properties of rice straw and paper mulberry fibers

	Rice straw	Paper mulberry bark	Appropriate value
Fiber length, mm.	0.79[b]	8.9[a]	
Fiber width, mm.	0.0102[b]	0.0289[a]	
Lumen size, mm.	0.0087[b]	0.0237[a]	
Thickness of cell wall, mm.	0.0015[b]	0.0051[a]	
Runkel ratio	0.34[b]	0.43[a]	<1
Flexibility coefficient	0.85[ns]	0.82[ns]	>0.5
Slenderness ratio	77.45[b]	307.95[a]	>75
Wall fraction, %	85.29[a]	82.00[b]	<50

Different letters in the same row (a, b) mean that the results are significantly different at $p \leq 0.05$by independent - sample t test.

Table 2 Chemical compositions of rice straw and paper mulberry bark

Analytical	Chemical component (% of dry weight)	
	Rice straw	Paper mulberry bark
Extractive	18.59[a]	14.07[b]
1. Solubility in Ethanol-Benzene	5.73[a]	3.35[b]
2.. Solubility in Ethanol	1.04[a]	0.45[b]
3. Solubility in hot water	11.82[a]	10.27[b]
Holocellulose	59.76[b]	77.03[a]
1. α-cellulose	35.49[b]	63.92[a]
2. Hemicellulose	24.27[a]	13.11[b]
Pantosan	17.86[a]	5.66[b]
Lignin	16.29[a]	2.8b[5]
Ash	12.35[a]	5.43[b]

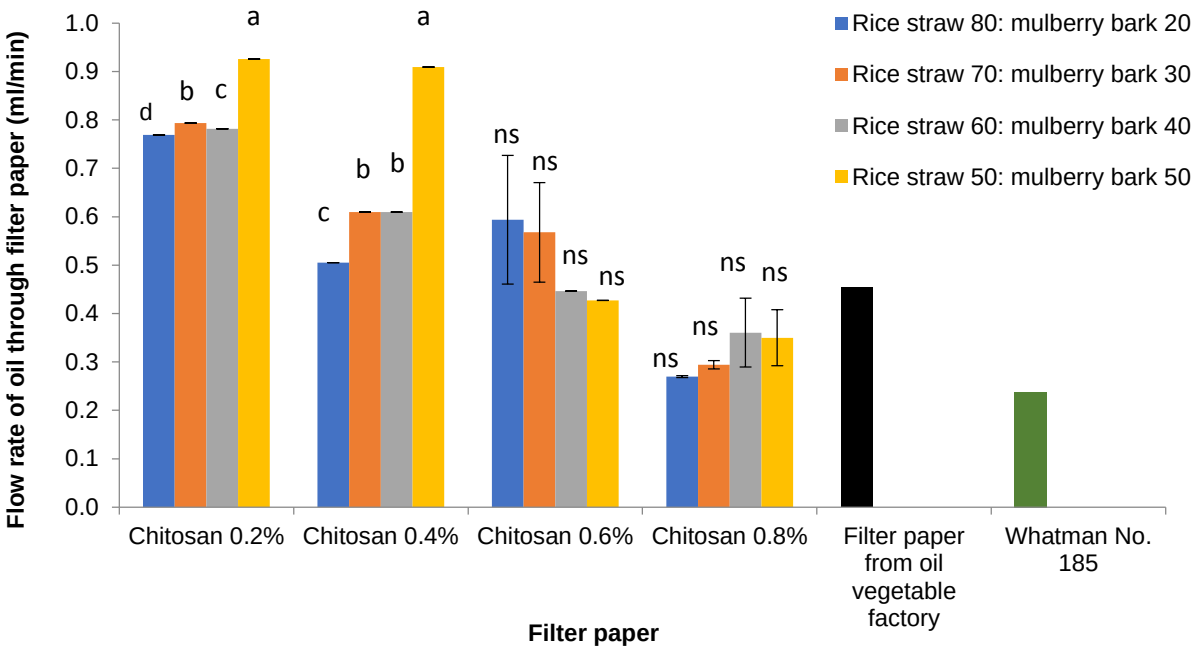
Different letters in the same row (a, b) mean that the results are significantly different at $p \leq 0.05$ byindependent sample t test. .

ศึกษาหาอัตราส่วนการผสมเยื่อที่เหมาะสม รวมทั้งชนิดและความเข้มข้นของสารที่ใช้เคลือบ

กระดาษฟางข้าวผสมปอสา ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ มาเคลือบด้วยสารไคโตซานและกลูโคแมนแนนปริมาณต่าง ๆ นำมาวัดอัตราการกรองน้ำมันพืชที่กรองผ่านกระดาษกรอง จำนวน 50 มิลลิลิตร เปรียบเทียบกับ

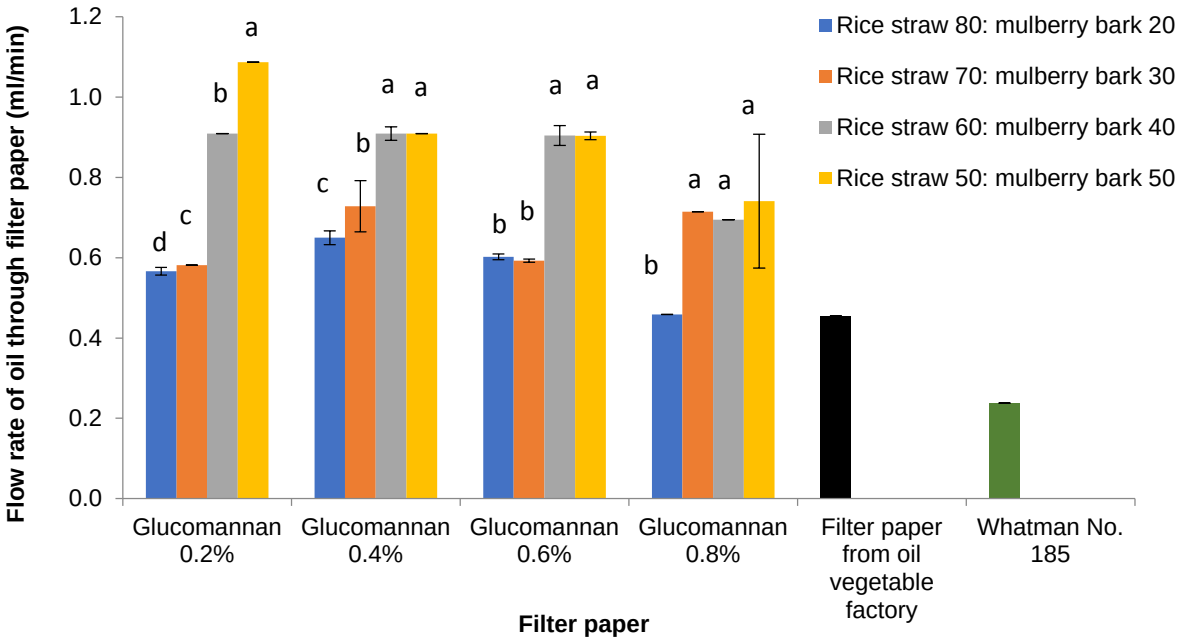
กระดาษกรองของโรงงานและกระดาษกรองของ Whatman No.185 (Figure 1 และ 2) ผลของอัตราส่วนของชนิดเส้นใย พบว่า กระดาษฟางข้าวที่ผสมเยื่อปอสามีอัตราการผสมที่แตกต่างกัน ทำให้มีผลต่ออัตราการกรองน้ำมัน โดยการเพิ่มเส้นใยฟางข้าวที่เป็นเส้นใยสั้นทำให้ช่วยลดช่องว่างระหว่างเส้นใยสั้นและยาว จึงทำให้มีอัตราการไหลช้ากว่ากระดาษกรองที่เตรียมจากอัตราส่วนของเส้นใยฟางข้าวและปอสา ที่ 50:50 เมื่อพิจารณาผลของสารเคลือบทั้งสองชนิดพบว่าการเคลือบด้วยสารไคโตซานที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.6-0.8 กระดาษจะมีการไหลผ่านของน้ำมันพืชที่ดีกว่าและใกล้เคียงกับกระดาษกรองของโรงงาน แต่ยังมากกว่ากระดาษของ Whatman No. 185 การเคลือบด้วยสารกลูโคแมนแนน ยังมีช่องว่างอยู่ทำให้การกรองน้ำมันพืชได้เร็ว แต่น้ำมันพืชที่กรองได้ยังไม่ใสเท่ากับการเคลือบด้วยไคโตซาน และเพื่อเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อฟางข้าวให้มาก จึงเลือกใช้เยื่อฟางข้าวผสมเยื่อปอสา 70:30 สำหรับนำมาผลิตกระดาษกรองเคลือบด้วยสารไคโตซานที่ความเข้มข้น สำหรับต่าง ๆ สำหรับนำไปศึกษาผลของสมบัติทางเชิงกลที่ได้ โดยใช้กระดาษกรองของ Whatman No. 185 และกระดาษกรองของโรงงานเป็นตัวเปรียบเทียบ

ในการพิจารณาคัดเลือกนั้นจะเน้นเวลาที่น้ำมันไหลผ่านกระดาษกรองเป็นปัจจัยหลักส่วนสมบัติเชิงกลจะให้ความสำคัญเป็นปัจจัยรอง (Table 3) และคงต้องใช้กระดาษของ Whatman No. 185 เป็นตัวเปรียบเทียบหลักเนื่องจากใช้ เวลาที่ไหลผ่านกระดาษกรองได้นานกว่ากระดาษกรองที่โรงงานใช้ซึ่งน่าจะเกิดจากรูพรุนของกระดาษที่มีขนาดที่เล็กกว่านั่นเอง เมื่อพิจารณาจากเวลาการไหลผ่านกระดาษกรองของ Whatman No. 185 ใช้อัตราการกรองน้ำมัน 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที จะใกล้เคียงกับกระดาษกรองฟางข้าวที่เคลือบด้วยสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.6 ใช้อัตราการกรองน้ำมัน 0.19 ml/min แต่สมบัติเชิงกลของกระดาษกรองฟางข้าวที่เคลือบด้วยสารละลายไคโตซานร้อยละ 0.6 จะดีกว่าผลิตภัณฑ์ต้นแบบมาก เมื่อนำกระดาษกรองน้ำมันจากฟางข้าวที่เคลือบด้วยสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.6 และกระดาษกรองของ Whatman No. 185 ส่องด้วยกล้อง SEM เพื่อดูขนาดรูพรุนของกระดาษที่กำลังขยาย 30 100 และ 300 เท่า ผลปรากฏว่ากระดาษกรองน้ำมันจากฟางข้าวมีรูพรุนขนาด 8.0 – 45.9 ไมครอน มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 20.55 ไมครอน ส่วนกระดาษกรองของ Whatman มีขนาดรูพรุน 10.4 – 54.9 ไมครอน มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 23.24 ไมครอน ขนาดรูพรุนของกระดาษกรองน้ำมันจากฟางข้าวมีขนาดเล็กกว่ากระดาษที่ใช้เปรียบเทียบ ลักษณะของรูพรุนแสดงดัง Figure 3-4 ซึ่งจะเห็นว่าที่กำลังขยายเท่ากัน ขนาดเส้นใยของฟางข้าวจะเล็กกว่าเส้นใยของกระดาษกรอง Whatman ซึ่งการสานกันของเส้นใยของฟางข้าวจะมีช่องว่างรูพรุนใกล้เคียงกระดาษกรอง Whatman และการยึดของสารเชื่อมระหว่างเส้นใยของทั้งสองวัตถุดิบใกล้เคียงกัน ทำให้ผลการกรองน้ำมันของกระดาษฟางข้าวและปอสาที่เลือก 70:30 และเคลือบด้วยสารละลายไคโตซาน 0.6% มีค่าใกล้เคียงกับ กระดาษกรอง Whatman



Different letters in the same concentration of chitosan (a, b, c and d) mean that the results are significantly different at $p < 0.05$ by Duncan multiple range test, ns means no significant difference at $p > 0.05$.

Figure 1 Flow rate of oil through the filter paper coated with chitosan



Different letters in the same concentration of glucomannan (a, b, c and d) mean that the results are significantly different at $p \leq 0.05$ by Duncan multiple range test.

Figure 2 Flow rate of oil through the filter paper coated with glucomannan

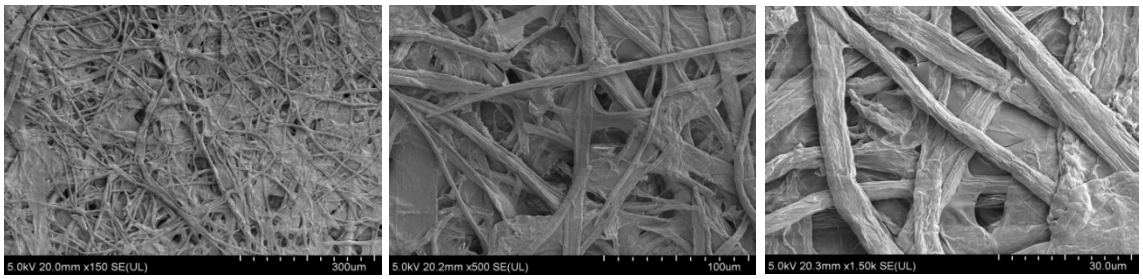


Figure 3 SEM micrographs of rice straw and paper mulberry filter paper at 70:30

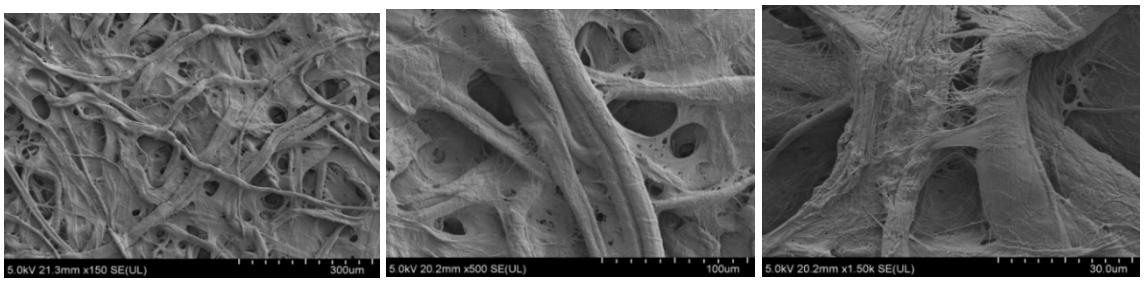


Figure 4 SEM micrographs of Whatman No. 185

Table 3 Mechanical properties and the flow rate of oil through the filter paper of rice straw and paper mulberry bark at 70:30 and coated with chitosan at different concentrations

Concentration of chitosan (%)	Basis weight of the paper (g/m^2)	Folding resistance	Tensile index (N.m/g)	Tear index ($mN.m^2/g$)	Burst index ($kPa.m^2/g$)	Flow rate of oil (ml/min)
0.0	79.89^{b}	16^{d}	16.76^{d}	33.62^{a}	1.84^{d}	0.81^{e}
0.2	81.15^{b}	214^{d}	25.80^{c}	31.03^{a}	2.64^{b}	0.61^{e}
0.4	85.62^{a}	956^{c}	31.38^{b}	25.71^{b}	3.22^{a}	0.35^{d}
0.6	85.00^{a}	$2,132^{b}$	38.91^{a}	23.09^{b}	3.26^{a}	0.19^{b}
0.8	84.69^{a}	$3,404^{a}$	37.42^{a}	23.40^{b}	3.39^{a}	0.15^{a}
Filter paper from oil factory	67.50^{c}	471^{d}	27.41^{bc}	17.66^{c}	2.22^{c}	0.56^{de}
Whatman No.185	85.67^{a}	19^{d}	25.07^{c}	10.71^{d}	1.03^{e}	0.25^{c}

Different letters in the same column (a, b, c, d and e) mean that the results are significantly different at $p \leq 0.05$ by Duncan's Multiple-Range

จากข้อมูลคุณสมบัติของกระดาษกรองน้ำมันพืชจากฟางข้าว (Table 4) มีคุณสมบัติดีกว่าตัวอย่างกระดาษกรองน้ำมันพืชที่โรงงานใช้และมีคุณภาพการกรองใกล้เคียงกับกระดาษกรองของ Whatman No. 185 ดังนั้นกระดาษกรองน้ำมันพืชจากฟางข้าวมีคุณภาพที่สามารถใช้งานและผลิตจำหน่ายได้

เมื่อคิดต้นทุนผลิตกระดาษกรองน้ำมันจากฟางข้าว 1 กรัม เป็นเงิน 2.049 บาท เปรียบเทียบราคากับกระดาษกรองน้ำมันของ Whatman No. 185 ที่มีราคาจำหน่ายกล่องละ 600 บาท ใน 1 กล่องมี 100 แผ่น เฉลี่ยราคาแผ่นละ 6 บาท ส่วนกระดาษกรองน้ำมันพืชที่โรงงานใช้นั้นไม่ทราบราคา แต่คิดว่าคงไม่ต่างกับกระดาษของ

Whatman No. 185 มากนัก ดังนั้นราคากระดาษกรองน้ำมันจากฟางข้าวที่พัฒนาแล้วมีราคาต่ำกว่ากระดาษกรองที่จำหน่ายอยู่ในขณะนี้ การผลิตกระดาษกรองโดยใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบหลักแล้วผสมด้วยเยื่อปอสาน่าจะเป็นทางเลือกใหม่ที่กลุ่มวิสาหกิจชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษสามารถผลิตจำหน่ายได้

Table 4 Properties of oil through the filter paper developed

Physical properties	Mechanical properties	Antimicrobial properties
Average weight 2.25 g/sheet Smoothness Average thickness 0.125 mm Sticky Average moisture 8.29% Average ash 4.96% Flow rate of oil through the filter paper 0.40 ml./minute	Basis weight of the paper 85 g/m^2 folding resistance 2,132 Tensile index dry paper 38.91 N.m/g Tensile index wet paper 38.91 N.m/g Tear index dry paper 23.40 mN.m^2/g Tear index wet paper 40 mN.m^2/g Burst index dry paper 3.26 kPa.m^2/g Burst index wet paper 2.88 kPa.m^2/g Average smoothness 10.45 s	After autoclave at 121 ^oC 15 minutes -not found total microorganism -not found yeast and fungi

สรุป

การศึกษาทดลอง การพัฒนากระดาษกรองน้ำมันพืชจากฟางข้าวเพื่อให้มีคุณสมบัติใช้กรองเศษพืชที่เกิดจากกระบวนการบีบน้ำมันเพื่อแยกสิ่งเจือปนออกไปจากน้ำมัน ผลการทดลองพบว่าฟางข้าวสามารถนำมาใช้ผลิตกระดาษกรองน้ำมันพืชได้ กระดาษกรองที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกับกระดาษกรองที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน ส่วนต้นทุนการผลิตเบื้องต้นจะต่ำกว่ากระดาษกรองที่มีจำหน่ายค่อนข้างมาก แต่ทั้งนี้จะต้องคำนวณต้นทุนที่แท้จริงอีกครั้ง ถ้าต้องการผลิตในระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการจะแตกต่างกับการปฏิบัติจริงอยู่บ้าง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนและส่งเสริมการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

วิชัย หฤทัยธนาสันติ์, วิขัณฑ์ อรรพานุรักษ์, วิทยา ปั้นสุวรรณ, วุฒินันท์ คงทัด, วารุณี ธนะแพสย์, ปริศนา สิริอาชา, บุศรินทร์ คงเสรี, วราภรณ์ อภิวัฒนาภิวัต, กุลธิดา อินทวัต, เสาวภาคย์ สาริมาน และศิริพร เสนียุทธ. 2545. **การปรับปรุงกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษจากปอสา**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 6 น.

วุฒินันท์ คงทัด, สุธีรา วิทยากาญจน์ และ ชัยพร สามพุ่มพวง. 2556. **การผลิตกระดาษพิเศษจากฟางข้าว**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ (สนับสนุนทุนวิจัยโดยสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

ภายใต้แผนงานวิจัยมุ่งเป้าตอบสนองความต้องการในการพัฒนาประเทศโดยเร่งด่วน) สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 78 น.

วิทยา ปั้นสุวรรณ. 2540. **การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้สำหรับอุตสาหกรรมกระดาษ**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 14 น.

Ahn, C.B. and E.H. Lee. 1992. Utilization of chitin prepared from the shellfish crust. 2. Effect of chitosan film packing on quality of lightly-salted and dried horse mackerel. **Bulletin of the Korean Fisheries Society Bull** 25*(1)*: 51–7.

Huonog, V.T.T. 2001. General status of non-wood plant fiber resources a paper industry in the Mekong delta, Vietnam. **Proceeding of the International Symposium on paper mulberry and handmade paper for rural development**. Bangkok, Thai land. 160-169

Anonymous. 2002-2003. **TAPPI Test Method**. The Technical Association of the Pulp and Paper Industry. TAPPI Press, Atlanta, Georgia

Bhale, S., H.K. No, W. Prinyawiwatkul, A.J. Farr, K. Nadarajah and S.P. Meyers. 2003. Chitosan coating improves shelf life of eggs. **Journal of Food Science** 68*(7)*: 2378–83.

Browning, B. L. 1967. **Methods of Wood Chemistry**. Interscience Publisher

Chang, K.L.B., Y.S. Lin and R.H. Chen. 2003. The effect of chitosan on the gel properties of tofu (soybean curd). **Journal of Food Engineering** 57: 315–9.

Chaobo, Xiao., Y. Lu and Lina. Zhang. 2001. Preparation and physical properties of konjac glucomannan-polyacrylamide blend films, **Journal of Applied Polymer Science**, 81, 4, 882

Chiu, Y-T. and M. Stewart. 2012. Comparison of konjac glucomannan digestibility and fermentability with other dietary fibers in vitro. **Journal of Medicinial Food**, 15, 120–125.

Franklin, G.L. 1945. Preparation of thin section of synthetic resins and wood-resins composite, and a new method for wood.**Nature** 155. 3924-3951.

Lim, S.K., T.W. Son, D.W. Lee, B.K. Park and K.M. Cho. 2001. Novel regeneragted cellulose fibers from rice straw. **Journal of Applied Polymer Science** 82: 1705-1708.

Ohkawa, A. 1988. What Kind of material is used to impart color to washi and The method. **Hand book on the art of Washi**. Pubished by Wagami-do KK 33-8 Hakusan u-chome, Bunkyo-ku Tokyo. 56-57

Rowell, R.M., R.A. Young and J.K. Rowell. 1997. **In Paper and Composites foam Agro-based Resources**. 7-427., CRC Press.

Preparation and Purification of Oligosaccharides from Commercially Defatted Rice Bran

Kamollak Jirakulkanok[1], Ladda Sangduean Wattanasiritham[2] and Pinthip Rumpagaporn[1*]

ABSTRACT

Rice bran is a common agricultural waste resource receiving increased attention as a food additive dietary fiber source. This research focused on the effects of alkaline pretreatment of destarched and deproteinized rice bran (DSPRB) before enzymatic reaction by β-1,4-endoxylanase for the production of oligosaccharides. Furthermore, we studied the activated carbon purification process for monosaccharide removal from enzymatic hydrolysate. Results revealed that alkaline-treated DSPRB significantly increased reducing sugar and oligosaccharide (xylooligosaccharides and arabino-xylooligosaccharides) yields compared to control ($P \leq 0.05$). From HPAEC-PAD analysis, total oligosaccharides from alkaline-treated DSPRB and DSPRB at 16 hours hydrolysis time was 33.59±0.35 and 14.15±0.16 mg/g, respectively. Activated carbon was an effective adsorbent for monosaccharide removal from enzymatic hydrolysate while an ethanol concentration of 30% (v/v) for elution provided the highest amount of total oligosaccharides ($P \leq 0.05$).

Key Words: defatted rice bran, oligosaccharides, alkaline pretreatment, activated carbon

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

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

[2]Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Rice bran, a by-product of the rice milling, is produced in large quantities in Thailand but usually used as inexpensive animal feed, fertilizer and for rice bran oil extraction. Rice bran cell walls contain lignocellulose components, an underutilized agricultural waste resource with greater potential and therefore deserving of increased scientific research. Lignocellulose material consists of cellulose, hemicellulose and lignin. Hemicellulose is a secondary yet abundant component in plant cell walls. Arabinoxylan is a major compound in hemicellulose found primarily in cereal bran. The linkages of xylan backbone can be hydrolyzed by β-1,4-endoxylanase enzyme to produce arabino-xylooligosaccharides (Swennen *et al*., 2006). Arabino-xylooligosaccharides are non-digestible food ingredients used in pharmaceuticals for promoting human health, especially for probiotic stimulation, improved bowel function, increased mineral absorption and lower cholesterol levels, thereby preventing various chronic illnesses (Gullon *et al*., 2014). To produce oligosaccharides from hemicelluloses, the enzymatic method is generally preferable due to the enzyme catalysis process being easily controlled, specific product, and its environmental-friendliness. However, lignocellulose linkages are both strong and resistant to decomposition and hydrolysis.

Alkaline pretreatments break down complex carbohydrates, improving the accessibility of β-1,4-endoxylanase to xylan (Kawee-ai *et al*., 2016) and hence increases xylooligosaccharide yield. Aachary and Prapulla (2009) reported that alkaline pretreatment increased xylan content in alkaline-pretreated corncob. After endoxylanase hydrolysis, extract from alkaline-pretreated corncob contained higher amounts of xylooligosaccharides compared to untreated corncob. However, monosaccharides might be generated during the process of enzymatic hydrolysis and should be eliminated from the oligosaccharides. Activated carbon is an adsorbent capable of purifying oligosaccharides and removing other undesired compounds. This absorbent has a large surface area and pore volume to separate high amounts of oligosaccharides caused by high adsorption capacity (Nobre *et al*., 2012).

This research studied the effect of alkaline pretreatments prior to xylanase hydrolysis to produce oligosaccharides from destarched and deproteinized rice bran (DSPRB). Additionally, enzymatic hydrolysate was purified by activated carbon to remove undesirable compounds. The yield of oligosaccharides was assayed by the amount of reducing sugar and quantified oligosaccharides with a high-performance anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection (HPAEC-PAD).

MATERIALS AND METHODS

1. Preparation of destarched and deproteinized rice bran

The defatted rice bran was kindly provided by Thai Edible Oil Co., Ltd. To prepare destarched and deproteinized rice bran , the method employed by Abdul-Hamid and Luan (2000) was conducted with slight modifications. Defatted rice bran (10% (w/v)) was first suspended in distilled water. The pH was adjusted to 7.0 with 1N NaOH and the sample was incubated with thermostable α-amylase (Termamyl® 120L, 0.4 ml/ 100g of substrate) at 100°C for 1 hour under continuous stirring. After cooling, protease (Alcalase® 2.4L FG, 3 ml/100g of substrate) was added into the suspension and incubated at 60°C for 2 hours (pH 7.5). Then, the pH was adjusted to 4.5 with 1N HCl. Amyloglucosidase (AMG® 300L, 3 ml/ 100g of substrate) was added and stirred at 60°C for 1 hour. The suspension was centrifuged (4,000xg, 30 min), the residue was washed with water, neutralize to pH 7 and dried at 50°C overnight in a hot air oven. Finally, dried samples were ground, sieved passed through 60 mesh and named DSPRB. All enzymes from Novozymes (Denmark) used in this study were kindly supported by Brenntag Ingredients (Thailand) Public Co., Ltd

2. Preparation of oligosaccharides from destarched and deproteinized rice bran

Before enzymatic hydrolysis, DSPRB was treated with alkaline according to method of Ai *et al*. (2005). DSPRB was mixed with 2% (w/v) sodium hydroxide solution at solid to liquid ratio of 1: 20 for 1 hour in water bath (30 °C). The suspension was centrifuged (4,000xg, 30 min), the residue was washed with distilled water, neutralized to pH 7, and dried at 50°C overnight in hot air oven. Alkaline-treated DSPRB was milled and passed through a sieve with mesh number 60.

DSPRB (Control) and alkaline-treated DSPRB were prepared at 2.5% (w/v) by dissolving in a 100 mM sodium phosphate buffer (pH 6.0). The enzymatic hydrolysis was performed by adding 4% (v/v) β-1,4-endoxylanase (Ultra Flo L, Novozymes, Bagsvaerd, Denmark) and incubating at 50 °C for 24 hours in water bath shaker. One milliliter of samples were taken at each sampling interval (0, 4, 8, 16 and 24 hours) and boiled for 15 min to inactivate the enzymes. Supernatant was recovered by centrifugation at 4,000xg for 10 min and stored at -20 °C. The amount of reducing sugar and the composition of hydrolysate in supernatant were analyzed.

3. Determination of reducing sugar

The amount of reducing sugar was determined by the 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS) method (Miller, 1959). The liquid samples 0.5 ml were mixed with 0.5 ml of DNS reagent. The mixture was then boiled for 15 min, immediately cooled by cold water and 5 ml of distilled water was added. The

absorbance of samples were measured by spectrophotometer at 540 nm and compared with the xylose standard curve at concentration 0-1 mg/ml.

4. Oligosaccharides analysis

Hydrolysate was analyzed by High-performance anion-exchange chromatography (HPAEC-PAD) using CarboPac PA200 guard column and analytical columns (3 x 250 mm) at 30 °C. Aliquots of supernatant were filtered with a 0.45-μm nylon membrane filter with an injection volume of 25 μl. The analyses were carried out using linear gradient of 120 mM NaOAc in 100 mM NaOH and 100 mM NaOH at flow rate 0.4 ml/min. A mixture of arabinose, xylose, xylooligosaccharides (DP 2-6) and arabino-xylooligosaccharides (A^3X, A^2XX, XA^3XX, $A^{2,3}XX$) was used as an external standard to identify and quantify obtained oligosaccharides (McCleary *et al*., 2015).

5. Purification of oligosaccharides by activated charcoal

Activated carbon powder (10% (w/v)) was added to the supernatant of hydrolysate and stirred at 250 rpm for 1 hour. The mixture was filtered with a 50 ml Pyrex crucible and washed twice with distilled water. Then, oligosaccharides adsorbed on activated carbon powder were eluted with different ethanol concentrations of 15%, 30% or 50% (v/v) twice (Wang and Lu, 2013). The liquid was concentrated by rotary evaporator and analyzed by high-performance anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection (HPAEC-PAD).

6. Statistical analysis

A complete randomized design was used in the experiment. Experimental data was performed using analysis of variance (ANOVA). Significant differences between each treatment were determined by Duncan's new multiple range test ($P \leq 0.05$). All data was reported as means ± standard deviations and performed in two replicates.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Effect of alkaline pretreatment on oligosaccharides preparation

Fig. 1 illustrates the effect of alkaline pretreatment on oligosaccharides preparation from DSPRB with β-1,4-endoxylanase hydrolysis. After enzymatic hydrolysis, the results showed that the amounts of reducing sugar obtained from alkaline-treated DSPRB were significantly higher than those from DSPRB ($P \leq 0.05$) at each interval of times (4, 8, 16 and 24 hours). At 24 hours of enzymatic reaction, the reducing sugar content produced from DSPRB and alkaline-treated DSPRB were the highest with 13.27±0.54 % and 28.29±0.91%, respectively. Yuan *et al*. (2015) elucidated the effect of alkaline pretreatment on enzymatic hydrolysis of canola meal and mustard bran by measuring pentose content to indicate the amount of oligosaccharides. They found that pretreated canola meal

and mustard bran increased the amounts of pentose sugar released at 18 hours of enzymatic reaction. Reducing sugar content can only represent the amount of hydrolysate containing both monosaccharides and oligosaccharides, however, and HPEAC-PAD analysis is needed to quantify the amount of oligosaccharides.

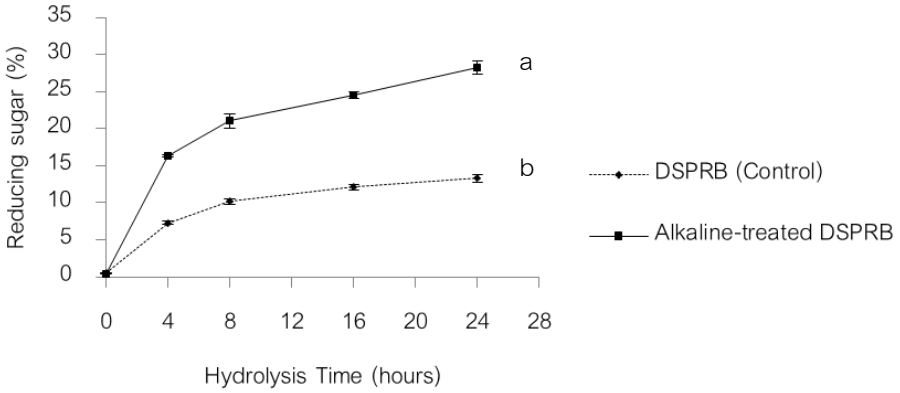


Figure 1 The amounts of reducing sugar from hydrolysate of DSPRB and alkaline-treated DSPRB with β-1,4-endoxylanase at different hydrolysis time. Means with different letters at each time point are significantly different (Duncan's new multiple range test, $p \leq 0.05$).

The results from HPEAC-PAD analysis (Table 1) indicated that Ultraflo L endoxylanase enzyme could produce xylooligosaccharides (XOS) and arabino-xylooligosaccharides (AXOS) from both DSPRB and alkaline-treated DSPRB. In addition, alkaline pretreatment significantly increased the yield of oligosaccharides at each time point of enzymatic reaction, and agreed with the results of reducing sugar content. For alkaline-treated DSPRB, there was no significant difference in the amount of XOS between 16 and 24 hours of hydrolysis and AXOS content produced at 16 hours was higher than at 24 hours. However, the amounts of monosaccharides were increased significantly from 16 to 24 hours of hydrolysis. The yield of oligosaccharides obtained at 16 hours was 3.36%, calculating based on the weight of alkaline-treated DSPRB.

Table 1 HPAEC-PAD analysis for quantification of XOS, AXOS and monosaccharides (mg/g) at each enzymatic hydrolysis times.

Raw material	Time (hours)	Monosaccharides	XOS	AXOS	Total OS
DSDPRB	4	17.04±0.00^{g}	2.97±0.01^{g}	0.93±0.01^{f}	3.90±0.02^{g}
	8	24.63±0.19^{f}	10.29±0.05^{f}	1.33±0.01^{e}	11.62±0.06^{f}
	16	28.11±0.21^{d}	12.58±0.16^{d}	1.57±0.01^{d}	14.15±0.16^{e}
	24	28.48±0.22^{d}	13.72±0.02^{c}	1.60±0.03^{d}	15.32±0.05^{d}
Alkaline-treated	4	26.61±0.22^{e}	12.09±0.06^{e}	2.44±0.03^{c}	14.54±0.04^{e}
DSDPRB	8	66.22±0.27^{c}	24.82±0.22^{b}	3.41±0.07^{b}	28.23±0.30^{c}

16	91.90±0.59[b]	29.74±0.19[a]	3.86±0.15[a]	33.59±0.35[a]
24	108.38±0.76[a]	29.57±0.17[a]	3.40±0.06[b]	32.97±0.23[b]

[a-g] Means within the same column followed by different letters were significantly different (p≤0.05).

Therefore, 16 hours was the reaction time that produced the highest amount of oligosaccharides from alkaline-pretreated samples. Under alkaline conditions, lignocellulose materials were destroyed by breaking down the linkage between hemicellulose and lignin and reducing the crystallinity of cellulose (Sun *et al*., 2015, Boonchuay *et al*., 2014). The cleavage of linkage increased the solubility of hemicellulose and hence the accessibility of enzyme for hydrolysis. This might be due to the physical changes of rice bran caused by the alkaline condition, namely swelling, and increased surface area and porosity of materials. In addition, alkaline solutions also removed the protein from those materials.

After enzymatic hydrolysis, high amounts of arabinose and xylose were generated due to Ultraflo L being a mixture of enzyme including β-1,4-xylanase, β-glucanase, α-arabinofuranosidase and β-xylosidase which cause a release of arabinose and xylose from arabinoxylan (Sorensen *et al*., 2002). Therefore, a purification process was needed to remove those monosaccharides and other unpurified compounds.

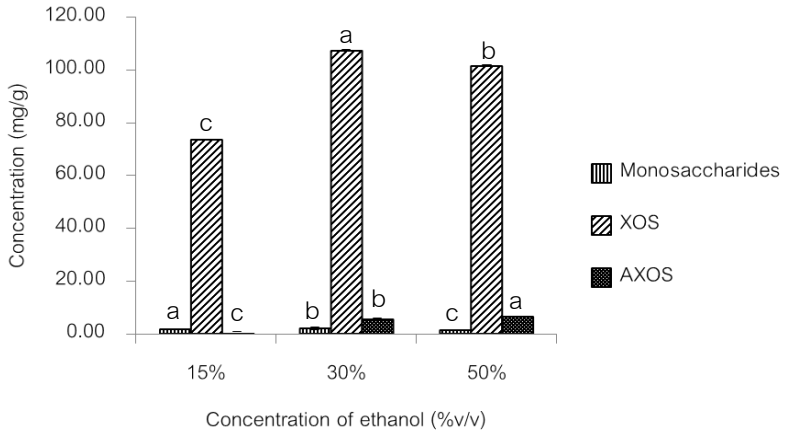


Figure 2 The amount of monosaccharides, XOS and AXOS of hydrolysate after purify with activated carbon powder with different concentration of ethanol. Means with different letters at different concentration of ethanol are significantly different (Duncan's new multiple range test, p≤0.05).

Activated carbon is an adsorbent used to purify oligosaccharides by water washing and ethanol elution. Fig. 2 shows the effect of oligosaccharides purification using activated carbon powder with different concentration of ethanol for elution. The results showed that activated carbon powder could remove monosaccharides from hydrolysate. From HPAEC-PAD analysis, aliquots of supernatant after elution with ethanol contained a small amount of monosaccharides 1.68 - 2.01 mg/g of substrate. This was caused by the adsorption of activated carbon with different saccharides degree of polymerization. Saccharides with longer chain lengths were more greatly adsorbed with

charcoal (Zhu *et al*., 2006), while monosaccharides had a little interaction with activated carbon and was easily removed by water washing. Nobre *et al*. (2012) studied the effects of adsorption for fructooligosaccharides purification. They found that sugar retention increased with high saccharide degree of polymerization while oligosaccharides could adsorb with activated charcoal better than monosaccharides.

Different amounts of oligosaccharides were eluted by various concentrations of ethanol. The highest significant amount of total oligosaccharides 112.96±0.13 mg/g of substrate was eluted by using 30% ethanol concentration ($P \leq 0.05$). Using 50% ethanol concentration, the amount of AXOS was higher than using 30% and 15% ethanol concentrations. However, XOS content eluted by 50% ethanol concentration was lower than the 30% ethanol concentration. This might be because the increased concentration of ethanol used to elute saccharides from activated carbon adsorption could remove larger degree of polymerization of oligosaccharides (Zhu *et al*., 2006).

CONCLUSION

Alkaline pretreatment is capable of increasing reducing sugar and oligosaccharides yielded by enzymatic hydrolysis from DSPRB. Therefore, this process has a potential to improve oligosaccharides yield during the process of raw material preparation. Ultraflo L xylanase enzyme could be used to hydrolyse hemicelluloses released from rice bran for xylooligosaccharides and arabino-xylooligosaccharides production. Activated carbon could be used for removing impure compounds and monosaccharides from enzymatic hydrolysate, and 30% ethanol concentration was suitable for oligosaccharides elution from the adsorption with activated carbon.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors sincerely appreciate the financial support by Graduate Program Scholarship from National Research Council of Thailand Annual 2018.

REFERENCES

Aachary, A.A. and S.G. Prapulla. 2009. Value addition to corncob: Production and characterization of xylooligosaccharides from alkali pretreated lignin-saccharide complex using *Aspergillus oryzae* MTCC 5154. **Bioresource Technology** 100: 991-995.

Abdul-Hamid, A. and Y.S. Luan. 2000. Functional properties of dietary fibre prepared from defatted rice bran. **Food Chemistry** 68: 15-19.

Ai, Z., Z. Jiang, L. Li, W. Deng, I. Kusakabe and H. Li. 2005. Immobilization of *Streptomyces olivaceoviridis* E-86 xylanase on Eudragit S-100 for xylo-oligosaccharide production. **Process Biochemistry** 40: 2707-2714.

Boonchuay, P., C. Techapun, P. Seesuriyachan and T. Chaiyaso. 2014. Production of xylooligosaccharide from corncob using a crude thermostable endo-xylanase from *Streptomyces thermovulgaris* TISTR1948 and Prebiotic properties. **Food Science and Biotechnology** 23: 1515-1523.

Gullon, B., P. Gullon, F. Tavaria, M. Pintado, A.M. Gomes, J.L. Alonso and J.C. Parajo. 2014. Structural features and assessment of prebiotic activity of refined arabinoxylooligosaccharides from wheat bran. **Journal of Functional Foods** 6: 438-449.

Kawee-ai, A., A. Srisuwun, N. Tantiwa, W. Nontaman, P. Boonchuay, A. Kuntiya, T. Chaiyaso and P. Seesuriyachan. 2016. Eco-friendly processing in enzymatic xylooligosaccharides production from corncob: Influence of pretreatment with sonocatalytic–synergistic Fenton reaction and its antioxidant potentials. **Ultrasonics Sonochemistry** 31: 184-192.

McCleary, B.V., V.A. McKie, A. Draga, E. Rooney, D. Mangan and J. Larkin. 2015. Hydrolysis of wheat flour arabinoxylan, acid-debranched wheat flour arabinoxylan and arabino-xylo-oligosaccharides by β-xylanase, α-L-arabinofuranosidase and β-xylosidase. **Carbohydrate Research** 407: 79-96.

Miller, G.L.. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination reducing sugar. **Analytical Chemistry** 31: 426-428.

Nobre, C., J.A. Teixeira and L.R. Rodrigues. 2012. Fructo-oligosaccharides purification from fermentative broth using an activated charcoal column. **New Biotechnology** 29: 395-401.

Sorensen, H.R., A.S. Meyer and S. Pedersen. 2002. Enzymatic hydrolysis of water-soluble wheat arabinoxylan. 1. Synergy between α-L-arabinofuranosidase, endo-1,4-β-xylanase, and β-xylosidase activities. **Biotechnology and Bioengineering** 81: 726-731.

Sun, S., S. Sun, X. Cao and R. Sun. 2015. The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. **Bioresource Technology** 19: 49-58.

Swennen, K., C.M. Courtin, G.C. Lindermans and J.A. Delcour. 2006. Large-scale production and characterization of wheat bran arabinoxylooligosaccharides. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 86: 1722-1731.

Wang, T. and S. Lu. 2013. Production of xylooligosaccharide from wheat bran by microwave assisted enzymatic hydrolysis. **Food Chemistry** 138: 1531-1535.

Yuan, L., M.G. Scanlon, N.A.M. Eskin, U. Thiyam-Hollandar and A.A. Aachary. 2015. Effect of pretreatments and Endo-1,4-β-xylanase hydrolysis of canola meal and mustard bran for production of oligosaccharides. **Applied Biochemistry and Biotechnology** 175: 194-208.

Zhu, Y., T.H. Kim, Y.Y. Lee, R. Chen and R.T. Elander. 2006. Enzymatic production of xylooligosaccharides from corn stover and corn cobs treated with aqueous ammonia. **Applied Biochemistry and Biotechnology** 129-132: 586-598.

การพัฒนาแผ่นดูดซับต้านจุลินทรีย์สำหรับการบรรจุเนื้อไก่สด

Development of Antimicrobial Absorbent Pad for Fresh Chicken Packaging

อนุชา แสนทวีสุข[1] และ อำพร เสน่ห์[1*]

Anucha Santhaweesuk[1] and Amporn Sane[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาความสามารถในการต้านจุลินทรีย์ให้กับแผ่นดูดซับสำหรับการบรรจุเนื้อไก่สด โดยมีการศึกษาประสิทธิภาพของสารต้านจุลินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ กรดฟูมาริค (fumaric acid) กรดซอร์บิค (sorbic acid) และซิลเวอร์ซีโอไลต์ (silver zeolite) ในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียชนิดต่างๆ ได้แก่ *Staphylococcus aureus, Enterococcus faecalis, Pseudomonas fluorescens, Escherichia coli, Salmonella typhimurium* และ *Acinetobacter calcoaceticus* โดยการเติมสารละลายของสารต้านจุลินทรีย์ลงไปที่ชั้นเส้นใยแผ่นดูดซับ การศึกษาประสิทธิภาพของสารต้านจุลินทรีย์ ทำได้โดยการหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (MIC), ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ (MBC) และขอบเขตของโซนยับยั้ง จากการทดลองพบว่าค่า MIC และ MBC ของกรดซอร์บิคสูงที่สุด รองลงมาคือ กรดฟูมาริค และซิลเวอร์ซีโอไลต์ ชี้ให้เห็นว่าซิลเวอร์ซีโอไลต์และกรดฟูมาริคมีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียได้ดีกว่ากรดซอร์บิค เมื่อนำกรดฟูมาริคและซิลเวอร์ซีโอไลต์ไปเติมในแผ่นเส้นใยสำหรับการเตรียมเป็นแผ่นดูดซับและนำไปใช้สำหรับการบรรจุเนื้อไก่สด พบว่าแผ่นดูดซับที่มีการเติมสารละลายของสารต้านจุลินทรีย์ทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้น 5-10 μg/mL สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียในแผ่นดูดซับเนื่องจากการเสื่อมเสียของเนื้อไก่สดได้ และมีศักยภาพที่จะนำไปใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่สด

ABSTRACT

The goal of research was to improve antimicrobial activity of absorbent pad for fresh chicken packaging. This study focused on determining the antimicrobial activity of fumaric acid, sorbic acid, and silver zeolite incorporated into fiber pad against *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, and *Acinetobacter calcoaceticus*. Antimicrobial activity of furmaric acid and silver zeolite was also investigated and it was found that the Minimum Inhibitory Concentration (MIC) and Minimum Bactericidal Concentration (MIC) of sorbic acid were higher than those of fumaric acid and silver zeolite. The results indicate that fumaric acid and silver zeolite are more effective antimicrobial agents than sorbic acid. After incorporation of fumaric acid and silver zeolite with concentrations of 5-10 μg/mL into fiber pad, the growth of bacteria inside absorbent pad decreased. The results show the potential application of antimicrobial absorbent pad for extending shelf life of fresh chicken.

Key Words: antimicrobial, chicken, absorbent pad, spoilage, shelf life, packaging

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

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

เนื้อไก่เป็นอาหารที่เน่าเสียได้ง่าย เนื่องจากมีปริมาณน้ำสูงและมีสารอาหารที่แบคทีเรียต้องการในการเจริญ จึงเหมาะแก่การเจริญเติบโตของแบคทีเรียโดยส่วนใหญ่ เนื้อไก่มักประสบปัญหาการสูญเสียน้ำจากการเก็บรักษาด้วยการแช่เย็น (Drip loss) และจากการแปรรูป และการตัดแต่งเนื้อไก่ ส่งผลให้น้ำและของเหลวจากเนื้อไก่ไหลออกมานอกชิ้นเนื้อ และกลายเป็นแหล่งอาหารให้กับแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของเนื้อไก่ ได้แก่ แบคทีเรียในกลุ่มของ *Staphylococcus aureus, Enterococcus faecalis, Pseudomonas fluorescens, Escherichia coli, Salmonella phimurium* และ *Acinetobacte calcoaceticus* ซึ่งแบคทีเรียเหล่านี้นอกจากจะส่งผลให้คุณภาพของเนื้อไก่ลดลง เนื้อสัมผัส สีและกลิ่นรสที่เปลี่ยนไป ยังเป็นแบคทีเรียซึ่งสามารถก่อให้เกิดโรคได้ โดยปกติแล้วภายในบรรจุภัณฑ์เนื้อไก่มักจะมีแผ่นดูดซับน้ำหรือของเหลวที่ออกมานอกเนื้อไก่ตัดแต่ง เพื่อช่วยชะลอการเสื่อมเสียจากแบคทีเรียที่อาศัยสารอาหารจากของเหลวเหล่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปแบคทีเรียจะไปเจริญอยู่ที่ตัวแผ่นดูดซับแทน ส่งผลให้เกิดการเสื่อมเสียของไก่ได้ ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจใช้สารต้านจุลินทรีย์ร่วมกับแผ่นดูดซับของเหลว เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของเนื้อไก่สด และชะลอการเสื่อมเสียจากแบคทีเรีย สารต้านจุลินทรีย์ที่นำมาศึกษาความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ในแผ่นดูดซับของเหลวสำหรับเนื้อไก่สด ได้แก่ กรดฟูมาริค (fumaric acid) กรดซอร์บิค (sorbic acid) และซิลเวอร์ซีโอไลต์ (silver zeolite) เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้กรดฟูมาริคและกรดซอร์บิคในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหาร อีกทั้งกรดอินทรีย์ทั้งสองชนิดนี้มีความคงตัวในอาหารและไม่ทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของอาหาร ดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดสี กลิ่นและรสที่ไม่พึงประสงค์ (Xiu *et al*., 2012) สำหรับสารประกอบซิลเวอร์นั้น มีการนำมาใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในผ้าปิดปากและจมูก และเส้นใยแผ่นกรองอากาศ เพื่อยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียและเชื้อรา (Barhate and Ramakrishna, 2007) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษาการพัฒนาความสามารถในการต้านจุลินทรีย์ให้กับแผ่นเส้นใยที่จะนำไปใช้ในการผลิตแผ่นดูดซับ เพื่อการนำไปใช้สำหรับการบรรจุเนื้อไก่สด

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดสอบประสิทธิภาพของสารต้านจุลินทรีย์

การทดสอบประสิทธิภาพของสารต้านจุลินทรีย์ทำโดยหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Minimum Inhibitory Concentration, MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ทั้งหมด (Minimum Bactericidal Concentration, MBC) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเป็นสารต้านจุลินทรีย์ของกรดฟูมาริค (Daejung, ประเทศเกาหลี) กรดซอร์บิค (Daejung, ประเทศเกาหลี) และซิลเวอร์ซีโอไลต์ (Sigma-Aldrich, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ในการยับยั้งการเจริญของ *Staphylococcus aureus (TISTR517), Enterococcus faecalis (*TISTR379*), Pseudomonas fluorescens (*TISTR904*), Escherichia coli (*TISTR117*), Salmonella phimurium (*TISTR1470*)* และ *Acinetobacte calcoaceticus (*TISTR360*)*

การตรวจสอบความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย (MIC) ของกรดฟูมาริค กรดซอร์บิค และซิลเวอร์ซีโอไลต์ ทำโดยเตรียมสารละลายของสารต้านจุลินทรีย์ที่มีความเข้มข้นในช่วง 1.25-10.00 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยทำการปิเปตสารแขวนลอยของเชื้อแบคทีเรียทดสอบที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้น 10^6–

10^8 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกค่า MIC ของสารต้านจุลินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่ำที่สุดที่สังเกตไม่เห็นการเจริญของเชื้อแบคทีเรียทดสอบ โดยดูจากความขุ่นของเชื้อแบคทีเรียที่เจริญในหลอดทดลอง โดยใช้น้ำกลั่นปราศจากเชื้อแบคทีเรียทดสอบเป็น Positive control และใช้อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว (Nutrient broth) ที่เติมสารทดสอบเป็น Negative control ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ในทุกๆ ตัวอย่าง

การตรวจสอบความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียทดสอบได้ทั้งหมด (MBC) ทำโดยนำหลอดทดลองข้างต้นที่ไม่พบการเจริญของเชื้อแบคทีเรียในการตรวจหา MIC ไปทำการเพาะเชื้อโดยใช้เทคนิค Spread plate บนอาหารเลี้ยงเชื้อ (Nutrient agar) จากนั้นนำไปบ่มในตู้บ่มเชื้อควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตและบันทึกผลการทดลอง โดยความเข้มข้นของสารต้านจุลินทรีย์ที่ไม่พบการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย คือ MBC และทำการทดลอง 3 ซ้ำในทุกๆ ตัวอย่าง

การทดสอบประสิทธิภาพของเส้นใยแผ่นดูดซับที่เติมสารทดสอบในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย

การทดสอบประสิทธิภาพของเส้นใยแผ่นดูดซับที่เติมสารทดสอบในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียโดยวิธี Agar diffusion ทำโดยเตรียมเส้นใยแผ่นดูดซับ (Kimberly Clark, สิงคโปร์) ที่เติมสารทดสอบ (กรดฟูมาริค กรดซอร์บิค และซิลเวอร์ซีโอไลต์) โดยตัดเส้นใยแผ่นดูดซับเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร นำไปทำให้ปลอดเชื้อด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (ยี่ห้อ Astell รุ่น AMA 204S, สหราชอาณาจักร) จากนั้นทำการสเปรย์เส้นใยแผ่นดูดซับด้วยสารละลายของสารทดสอบในเอทานอล ปริมาตร 600 ไมโครลิตร โดยมีการผันแปรความเข้มข้นของสารทดสอบในช่วง 0.125–1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดเอทานอลออกไป และนำไปวางลงบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่ได้มีการเกลี่ยสารแขวนลอยของแบคทีเรียทดสอบที่มีปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10^6–10^8 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ในปริมาตร 1 มิลลิลิตรไว้แล้ว นำไปบ่มในตู้บ่มเชื้ออุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกผลการทดลองโดยสังเกตโซนยับยั้ง (Clear zone) หรือบริเวณที่ไม่พบการเจริญของเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้น (Inhibition zone) โดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้งที่เป็นหน่วยมิลลิเมตร และทำการทดลอง 3 ซ้ำ

การเตรียมแผ่นดูดซับต้านแบคทีเรีย

นำแผ่นเส้นใยที่มีการเติมสารละลายสารทดสอบ (กรดฟูมาริค กรดซอร์บิค และซิลเวอร์ซีโอไลต์) ในเอทานอล โดยมีการผันแปรชนิดและความเข้มข้นของสารทดสอบในช่วง 0.50–1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นมาอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดเอทานอลจากแผ่นเส้นใย หลังจากนั้นเติม Carboxy Methyl Cellulose (CMC) (เคมีภัณฑ์ ประเทศไทย) ในปริมาณ 0.4 กรัม โดยใช้แท่งแก้วเกลี่ยให้ CMC กระจายตัวบนพื้นผิวของแผ่นเส้นใยอย่างสม่ำเสมอ และประกบติดชั้น CMC ด้วยแผ่นเส้นใยดูดซับต้านจุลินทรีย์อีกแผ่นหนึ่ง แล้วนำไปหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 2 แผ่น ทำจากวัสดุผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทเรฟทาเลท ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 40:60 โดยฟิล์มด้านล่างมีการเจาะรูและด้านบนไม่มีการเจาะรู จากนั้นปิดผนึกฟิล์มทั้งสองชั้นเข้าด้วยกันด้วยความร้อน และนำไปเก็บในตู้ปลอดเชื้อเพื่อรอการใช้งานต่อไป

การทดสอบประสิทธิ์ภาพของแผ่นดูดซับยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียจากเนื้อไก่สด

การทดสอบประสิทธิ์ภาพของแผ่นดูดซับที่มีการเติมสารทดสอบต่อการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่มาจากของเหลว (Drip loss) จากเนื้อไก่สด ทำโดยนำแผ่นดูดซับที่เติมสารต้านจุลินทรีย์ไปทำการบรรจุร่วมกับเนื้อสันในไก่สดน้ำหนัก 150 กรัม โดยหันแผ่นดูดซับที่มีฟิล์มด้านเจาะรูลงบนถาดโฟมและวางเนื้อสันในไก่ด้านบนของแผ่นดูดซับ จากนั้นนำไปห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกใสชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์ (M Wrap) และนำไปเก็บในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน โดยทำการตรวจนับเชื้อในวันที่ 0, 1, 3, 5, 7, 10 และ 14

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดของสารต้านจุลินทรีย์ในการยับยั้งและฆ่าเชื้อแบคทีเรีย

ผลการทดสอบค่า MIC และ MBC ของสารต้านจุลินทรีย์ (ซิลเวอร์ซีโอไลต์ กรดฟูมาริค และกรดซอร์บิค) โดยแปรผันความเข้มข้นในช่วง 1.25–10.00 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ชี้ให้เห็นว่าซิลเวอร์ซีโอไลต์เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการยับยั้งการเจริญของ *Staphylococcus aureus, Enterococcus faecalis, Pseudomonas fluorescens, Escherichia coli, Salmonella typhimurium* และ *Acinetobacter calcoaceticus* โดย MIC ของซิลเวอร์ซีโอไลต์ต่ำกว่า 1.25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (Table 1) และ MBC ของซิลเวอร์ซีโอไลต์ต่ำกว่า 1.25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สำหรับทุกแบคทีเรียทดสอบ ยกเว้นในกรณีของ *Acinetobacter calcoaceticus* ที่ MBC เท่ากับ 2.50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สารต้านจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพรองลงมา คือ กรดฟูมาริค ที่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทดสอบได้ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1.25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เช่นเดียวกับซิลเวอร์ซีโอไลต์ สำหรับ MBC ของกรดฟูมาริคในการทำลายแบคทีเรียทดสอบโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 2.50–5.00 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ส่วนกรดซอร์บิคมีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียได้ต่ำที่สุดในบรรดาสารทดสอบทั้งหมด โดยมีค่า MIC อยู่ในช่วง <1.25–5.00 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และ MBC อยู่ในช่วง 2.50–5.00 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยแนวโน้มผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทดสอบสอดคล้องกับผลการทดสอบกรณีแบคทีเรียจากเนื้อไก่สด (Total viable count) เช่นเดียวกัน และแนวโน้มผลการทดลองที่ได้ในกรณีของซิลเวอร์ซีโอไลต์มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Fernandez *et al*. (2009) ที่ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเส้นใยเซลลูโลสที่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ต่อการยับยั้งการเจริญของ *S. aureus* และ *E. coli*

Table 1 MIC and MBC of antimicrobial agents against testing bacteria

Strains	Silver-zeolite (µg/mL)		Fumaric acid (µg/mL)		Sorbic acid (µg/mL)	
	MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC
Salmonella spp. TISTR1470	<1.25	<1.25	<1.25	2.50	<1.25	5.00
Pseudomonas spp. TISTR904	<1.25	<1.25	<1.25	5.00	<1.25	2.50
Enterococcus spp. TISTR379	<1.25	<1.25	<1.25	<1.25	2.50	5.00
Acinetobacter spp. TISTR360	<1.25	2.50	<1.25	5.00	5.00	5.00
S. aureus spp. TISTR517	<1.25	<1.25	<1.25	2.50	<1.25	5.00
E. coli spp. TISTR117	<1.25	<1.25	<1.25	2.50	<1.25	5.00
Total viable count	<1.25	<1.25	<1.25	5.00	2.50	5.00

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเส้นใยแผ่นดูดซับในการต้านแบคทีเรีย

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเส้นใยแผ่นดูดซับที่มีการเติมสารทดสอบ ได้แก่ ซิลเวอร์ซีโอไลต์ กรดฟูมาริค และกรดซอร์บิค โดยวิธี Agar diffusion และใช้ความเข้มข้นของสารทดสอบ 5.00–10.00 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ต่อการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทดสอบแสดงใน Table 2 ซึ่งความเข้มข้นของสารต้านจุลินทรีย์ที่เลือกใช้ในการศึกษาขั้นนี้อ้างอิงจากค่า MBC ที่ตรวจวัดได้ในข้อที่ผ่านมา โดยที่ความเข้มข้น 5.00 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เป็นค่าความเข้มข้นที่ทั้งซิลเวอร์ซีโอไลต์ กรดฟูมาริค และกรดซอร์บิคสามารถฆ่าแบคทีเรียทดสอบได้ทั้งหมด จากผลการทดลอง โดยวิธี Agar diffusion พบว่าการเติมซิลเวอร์ซีโอไลต์ และกรดฟูมาริคลงในเส้นใยแผ่นดูดซับ แสดงโซนยับยั้งที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียจากสันในไก่ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนยับยั้งเฉลี่ยเท่ากับ 10.2±0.3 และ 10.6±0.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ (Figure 1) และแสดงโซนยับยั้งที่มีขนาดเล็กที่สุดเมื่อทดสอบกับ *Salmonella typhimurium (*5.4±0.8 มิลลิเมตร) และ *Escherichia Coli (*6.5±0.4 มิลลิเมตร) ตามลำดับ กรดซอร์บิคแสดงโซนยับยั้งที่มีขนาดเล็กที่สุด และไม่ปรากฏโซนยับยั้งในกรณีการทดสอบกับ *Pseudomonas fluorescens* และ *Enterococcus faecalis* (Table 2) โดยผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทดสอบสอดคล้องกับผลการทดสอบจากแบคทีเรียจากเนื้อไก่สด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารต้านจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของโซนยับยั้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ได้มีการคำนวณค่าดัชนีการต้านจุลินทรีย์ (antimicrobial index) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยค่าดัชนีการต้านจุลินทรีย์สามารถหาได้จากสมการดังต่อนี้

ค่าดัชนีการต้านจุลินทรีย์ = [ขนาดของโซนยับยั้ง – ขนาดของแผ่นดูดซับ]/ ขนาดของแผ่นดูดซับ

Table 2 Inhibition zone and antimicrobial index of absorbent pads incorporated with antimicrobial agents at concentration of 10 µg/mL

Strain	Average diameter of inhibition zone (mm)			Antimicrobial index		
	Silver-zeolite	Fumaric acid	Sorbic acid	Silver-zeolite	Fumaric acid	Sorbic acid
Salmonella spp. TISTR1470	5.4±0.8	7.7±0.5	1.0±0.2	0.270	0.385	0.05
Pseudomonas spp. TISTR904	10.1±0.4	9.5±0.3	-	0.505	0.475	-
Enterococcus spp. TISTR379	6.2±0.6	7.3±0.3	-	0.310	0.365	-
Acinetobacter spp. TISTR360	8.3±0.7	9.8±0.2	5.0±0.4	0.415	0.490	0.250
S. aureus spp. TISTR517	6.3±0.5	7.0±0.2	4.0±0.1	0.315	0.350	0.200
E. coli spp. TISTR117	6.2±0.2	6.5±0.4	2.1±0.2	0.310	0.325	0.105
Total viable count	10.2±0.3	10.6±0.5	-	0.510	0.530	-

Note: "-" no inhibition zone was observed.

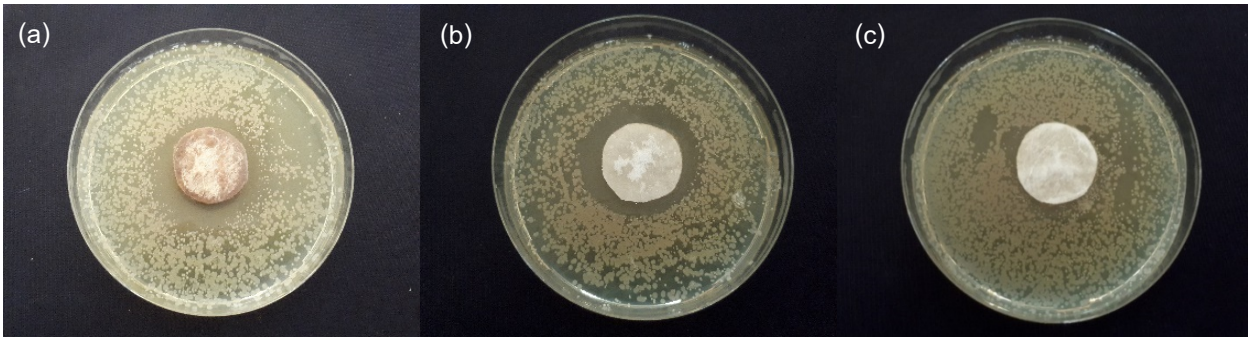


Figure 1 Zone of microbial growth inhibition of fiber pads incorporated with different antimicrobial agents (10 µg/mL): (a) silver zeolite, (b) fumaric acid, and (c) sorbic acid.

การทดสอบประสิทธิ์ภาพของแผ่นดูดซับที่มีการเติมสารต้านจุลินทรีย์ต่อการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียจากเนื้อไก่สด

ในการทดสอบประสิทธิ์ภาพของแผ่นดูดซับต้านแบคทีเรียในการบรรจุสันในไก่สดนั้น ทำการทดลองกับซิลเวอร์ซีโอไลต์และกรดฟูมาริคเท่านั้น เนื่องจากกรดซอร์บิคมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียต่ำกว่าสารทั้งสองชนิดมาก โดยในขั้นตอนนี้ได้เลือกใช้ความเข้มข้นของสารต้านจุลินทรีย์ เท่ากับ 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เติมลงไปในแผ่นเส้นใยที่ใช้ในการเตรียมแผ่นดูดซับ เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่แสดงโซนยับยั้งที่มีขนาดใหญ่ที่สุดหรือแสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการตรวจวัดจำนวนแบคทีเรียที่เจริญอยู่ในแผ่นดูดซับที่ไม่มีการเติมสารต้านจุลินทรีย์ หรือ ตัวอย่างควบคุม (control) พบมีจำนวนแบคทีเรียเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 3 และมีแนวโน้มเพิ่มมากอย่างเด่นชัดในวันที่ 4 และ 5 (Figure 2) โดยแผ่นดูดซับที่มีการเติมซิลเวอร์ซีโอไลต์และกรดฟูมาริค มีการเจริญของแบคทีเรียในอัตราที่ต่ำกว่า และจำนวนแบคทีเรียที่พบในแผ่นดูดซับที่มีการเติมซิลเวอร์ซีโอไลต์นั้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับที่มีการเติมกรดฟูมาริค ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้ยังสามารถยืนยันได้ว่าซิลเวอร์ซีโอไลต์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียในแผ่นดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่ากรดฟูมาริค ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองของ Fernandez *et al.* (2010) ที่ใช้ซิลเวอร์ไนเตรตในการทดสอบการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์เมลอนตัดแต่งพร้อมบริโภค แต่อย่างไรก็ตามแผ่นเส้นใยที่มีการเติมซิลเวอร์ซีโอไลต์นั้นจะเปลี่ยนเป็นสีออกน้ำตาลเข้ม จึงอาจทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Silva et al. (2017) ซึ่งได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของ pinosylvin ที่เคลือบบนผิวของแผ่นดูดซับต่อการยับยั้งการเจริญเชื้อแบคทีเรียจากผลิตภัณฑ์เนื้อไก่สด พบว่ายับยั้งการเจริญของเชื้อจากเนื้อไก่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่พบการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย จนถึงวันที่ 4 ของการทดลอง และเชื้อกลับมาเจริญเพิ่มขึ้นในวันที่ 5 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่พบการเจริญอย่างมากภายในแผ่นดูดซับในวันที่ 5

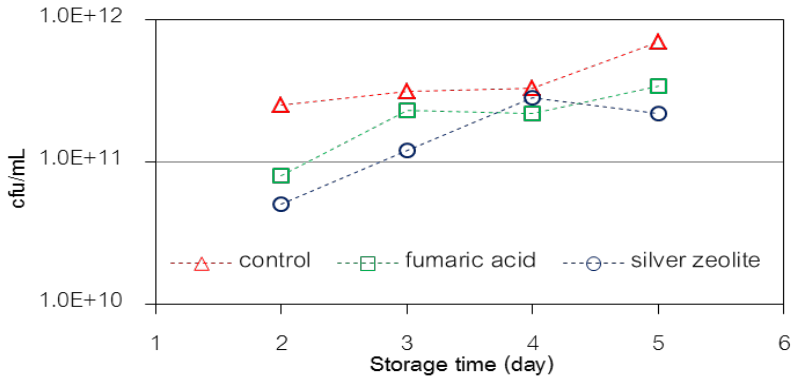


Figure 2 Total viable count in absorbent pads incorporated with silver zeolite and fumaric acid.

สรุป

กรดฟูมาริค กรดซอร์บิค และซิลเวอร์ซีโอไลต์ มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียชนิดต่างๆ ได้แก่ *Staphylococcus aureus, Enterococcus faecalis, Pseudomonas fluorescens, Escherichia coli, Salmonella typhimurium* และ *Acinetobacter calcoaceticus* โดยค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (MIC) และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ (MBC) ของกรดซอร์บิคสูงที่สุด รองลงมาคือ กรดฟูมาริค และซิลเวอร์ซีโอไลต์ แสดงให้เห็นว่ากรดฟูมาริคและซิลเวอร์ซีโอไลต์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียสูงกว่ากรดซอร์บิค และเมื่อนำกรดฟูมาริคและซิลเวอร์ซีโอไลต์ไปเติมในแผ่นเส้นใยสำหรับการเตรียมเป็นแผ่นดูดซับเพื่อนำไปใช้สำหรับการบรรจุเนื้อไก่สด โดยแผ่นดูดซับที่มีการเติมซิลเวอร์ซีโอไลต์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียในแผ่นดูดซับได้สูงกว่าแผ่นดูดซับที่มีการเติมกรดฟูมาริค

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทคิมเบอร์ลี่-คล๊าคที่ให้การสนับสนุนแผ่นเส้นใยดูดซับที่ใช้ในการทดลอง และขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์การมหาชน) (สพภ.) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Barhate, R. and S. Ramakrishna. 2007. Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials. **Journal of Membrane Science** 296: 1-8.

Fernandez, A., Picouet, P. and E. Lloret. 2010. Cellulose-silver nanoparticle hybrid materials to control spoilage-related microflora in absorbent pads located in trays of fresh-cut melon. **International Journal of Food Microbiology** 142(1-2): 222-228.

Fernandez, A., Soriano, E., Lopez-Carballo, G., Picouet, P., Lloret, E. and R. Gavara. 2009. Preservation of aseptic conditions in absorbent pads by using silver nanotechnology. **Food Research International** 42(8): 1105-1112.

Silva, F., Domingues C. F. and C. Nerín. 2017. Control microbial growth on fresh chicken meat using pinosylvin inclusion complexes based packaging absorbent pads. **Food Science and Technology** 89: 148-154.

Xiu, Z. M., Q. B. Zhang, H. L. Puppala, V. L. Colvin and P. J. Alvarez. 2012. Negligible particle-specific antibacterial activity of silver nanoparticles. **Nano Letters** 12(8): 4271-4275.

ผลของแป้งเผือกและแป้งข้าวเหนียวต่อคุณภาพเผือกเคี้ยวหนึบ

Effect of Taro Flour and Sticky Rice Flour on the Quality of Chewing Taro

วันสิริ พุกเฉื่อย[1] และ กมลวรรณ แจ้งชัด[1*]

Wansiri Pukchuey[1] and Kamolwan Jangchud[1*]

บทคัดย่อ

เผือกเป็นพืชหัวที่ใช้ลำต้นสะสมอาหาร นิยมแปรรูปเป็นแป้งเพื่อใช้สำหรับประกอบอาหาร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแป้งเผือก (แป้งเผือกดิบ และแป้งเผือกสุกบางส่วน) และแป้งข้าวเหนียว ต่อคุณภาพทางกายภาพ และประสาทสัมผัสของเผือกเคี้ยวหนึบ วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด โดยศึกษาแป้งเผือกทั้ง 2 ชนิดที่ 0, 25, 50, 75 และ100% ของปริมาณแป้งทั้งหมด ผลการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งแต่ละชนิด ด้วยเครื่อง RVA พบว่า แป้งข้าวเหนียว แป้งเผือกดิบ และแป้งเผือกสุก มีค่าความหนืดสูงสุดเท่ากับ คือ 292.3±0.2, 142±2.7, 112.8±1.6 RVU ตามลำดับ จากการทดสอบทางกายภาพ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกดิบ หรือแป้งเผือกสุกบางส่วนจาก 0 เป็น 75% ทำให้ค่า Hardness และ Gumminess สูงขึ้น และมีคะแนนความชอบของ สี กลิ่นรสเผือก รสหวานมีคะแนนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกดิบ หรือแป้งเผือกสุกบางส่วนถึง 100% พบว่าคะแนนความชอบความเหนียวลดลง และความชอบโดยรวมมีแนวโน้มลดลง จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์เผือกเคี้ยวหนึบ คือแป้งเผือกดิบต่อแป้งข้าวเหนียวเท่ากับ 50:50

ABSTRACT

Taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) is a tuber crop. It can be processed for cooking food. The objective of this research was to study the effect of taro flour (raw taro flour (RTF) and partially gelatinized taro flour (PGF)) and sticky rice flour on the physical and sensory properties of chewing taro. The completely randomized design was used in this study. The amount of 2 types of taro-flour was studied at 0, 25, 50, 75 and 100% of total flour in the formula. The viscosity behaviour from RVA revealed that the peak viscosity of sticky rice flour, RTF, and PGF was 292.3±0.2, 142±2.7, 112.8±1.6 RVU, respectively. The results from the measurement of physical properties revealed that increasing the amount of RTF or PGF from 0 to 75% resulted in an increase of hardness and gumminess. The liking scores in color, taro odor and sweetness of chewing taro also increased as the amount of RTF or PGF increased. However, when increasing the amount of RTF or PGF to 100% resulted in a decrease of liking score of stickiness and the overall liking tended to decrease. From this study, the optimum ratio of RTF to sticky rice flour to produce chewing taro was 50:50.

Key Words: sticky rice flour, raw taro flour, partially gelatinized taro flour, chewing taro

*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

เผือก (Taro) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Colocasia esculenta* L. เผือกเป็นพืชหัวที่ใช้ลำต้นสะสมอาหารเพื่อใช้งอกสำหรับการเจริญเติบโต (FAO, 1999) สารอาหารที่ได้จากเผือกส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตในรูปแป้งจึงนิยมแปรรูปเผือกให้อยู่ในรูปของแป้ง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมและการเก็บรักษา โดยพันธุ์ของเผือกที่นิยมนำมาประกอบอาหารคือ เผือกหอม (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) (Onwueme, 1999) แป้งเผือก เป็นแป้งที่ได้จากการนำเผือกมาแปรรูปให้เป็นผงละเอียด (Perez *et al*., 2005) เนื้อแป้งมีสีขาวขุ่นปนน้ำตาล เนื้อหยาบเล็กน้อย มีกลิ่นหอม (เสาวภรณ์, 2554) จากการศึกษาของ Alcantara *et al*. (2013) พบว่าองค์ประกอบของแป้งเผือกประกอบไปด้วย ความชื้น 6.21% คาร์โบไฮเดรต 85.60% โปรตีน 8.07% ไขมัน 0.45% ใยอาหาร 3.10% เถ้า 2.78% และมีปริมาณอะไมโลโลสอยู่ในช่วง10-13% (Rodriguez *et al*., 2011) มีการใช้ประโยชน์จากเผือกโดยนำมาประกอบอาหารได้หลากหลาย เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากเผือก บัวลอยเผือก เผือกกวน เผือกน้ำกะทิ ขนมหม้อแกง และตะโก้เผือก หรือนำไปแปรรูปให้เป็นแป้งเผือกก่อนนำไปประกอบอาหาร (เสาวภรณ์, 2554)

แป้งสุกบางส่วน (Partially gelatinized starch) เป็นสตาร์ชที่ทำให้สุกบางส่วนในช่วง 75-80% (Lee & Hamidah, 1997) การนำแป้งสุกบางส่วนมาเป็นส่วนผสมในอาหาร มีผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยคุณสมบัติของแป้งการพรีเจลาติไนซ์นี้ คืออุ้มน้ำได้ดีทำให้สามารถนำไปใช้ผสมกับอาหารปรุงสำเร็จรูปได้ และละลายได้ดีในน้ำเย็น (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2550) ดังนั้นจึงมีแนวคิดพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมเผือกกวน ในรูปแบบเผือกกวนเคี้ยวหนึบโดยมีส่วนผสมหลัก คือ แป้งเผือก แป้งข้าวเหนียว และส่วนผสมอื่นๆ ได้แก่ น้ำตาลทราย กะทิ และสารช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสใหม่แบบเหนียวหนึบ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแป้งเผือก (แป้งเผือกดิบ และแป้งเผือกสุกบางส่วน) และแป้งข้าวเหนียว ต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เผือกเคี้ยวหนึบ เพื่อให้ได้ปริมาณแป้งเผือก และแป้งข้าวเหนียวที่เหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การศึกษาคุณภาพของวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ศึกษาคือ แป้งเผือกดิบ แป้งเผือกสุกบางส่วน (โดยแป้งทั้ง 2 ชนิด ผลิตจากเผือกหอมเชียงใหม่สายพันธุ์ พจ.016) และแป้งข้าวเหนียว (เชิงพาณิชย์) โดยวิธีการเตรียมแป้งเผือกแบบดิบ ดัดแปลงจาก Arici *et al.* (2016) นำเผือกหอมมาปอกเปลือก ล้างน้ำให้สะอาด พักบนตะแกรงให้สะเด็ดน้ำ ฝานเป็นแผ่นบางหนา 1 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องหั่นสไลด์ ได้แผ่นเผือก 1 มิลลิเมตร นำเข้าอบด้วยตู้อบแห้งแบบถาด (Tray Dryer) อบที่อุณหภูมิ 65±2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่อง Hammer mill ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 Mesh เก็บบรรจุในถุงพลาสติกชนิด Polyethylene (PE) ด้วยเครื่องปิดผนึกสุญญากาศ

การเตรียมแป้งเผือกสุกบางส่วน ล้างทำความสะอาดและฝานด้วยเครื่องสไลด์เช่นเดียวกับวิธีทำแป้งเผือกดิบ จากนั้นนึ่งให้สุกด้วยลังถึงรองด้วยผ้าขาวบางที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที ดัดแปลงจาก Kaur *et al.* (2011) แล้วเข้าตู้อบแห้งแบบถาด อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16 ชั่วโมง บดด้วยเครื่อง Hammer mill ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 Mesh เก็บบรรจุในถุงพลาสติกชนิด Polyethylene (PE) ด้วยเครื่องปิดผลึกสุญญากาศ จากนั้นนำแป้งทั้ง 3 ชนิด (แป้งเผือกดิบ แป้งเผือกสุกบางส่วน และแป้งข้าวเหนียว) มา

วิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) รุ่น 4D ยี่ห้อ Newport ประเทศออสเตรเลีย ตามวิธีของ ICC. Standard method NO. 162 (1996) โดยใช้วิธีมาตรฐาน AACC 61.02 (AACC, 2000) ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2. การศึกษาผลของปริมาณแป้งเผือก และแป้งข้าวเหนียวต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เผือกเคี้ยวหนึบ

ศึกษาผลของปริมาณแป้งเผือกและแป้งข้าวเหนียวในส่วนผสมของแป้ง โดยแยกศึกษาแป้งเผือก 2 ชนิด คือ แป้งเผือกดิบ และแป้งเผือกสุกบางส่วน วางแผนการทดลองโดยจัดสิ่งทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design, CRD) คือ ปริมาณแป้งเผือกดิบ หรือแป้งเผือกสุกบางส่วน 0, 25, 50, 75 และ100%

สูตรพื้นฐานของผลิตภัณฑ์เผือกเคี้ยวหนึบประกอบด้วย แป้ง (แป้งเผือก และแป้งข้าวเหนียว) 16.0% น้ำตาลทราย และกลูโคสไซรัป 21.8% กะทิผง 5.0% เจลาติน 0.85% และน้ำ 57.02% โดยอัตราส่วนผสมดัดแปลงจากสูตรผลไม้กวน ของวิภาวัน และรุ่งทิวา (2553) และขั้นตอนการทำดัดแปลงจาก ขั้นการทำเผือกกวน ของเสาวภรณ์ (2554) โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 70-80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 25 นาที เมื่อครบเวลาแล้วตักส่วนผสมใส่ภาชนะ พักให้เย็น 30 นาที ใช้ถุงมือพลาสติกสำหรับอาหาร ปั้นเป็นก้อนทรงกลมให้มีน้ำหนักชิ้นละ 3.5 กรัม นำเรียงในถาดอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกมาพักให้เย็น 10 นาที เก็บบรรจุในถุงพลาสติกพอลีโพรพีลีน ขนาด 3×5 นิ้ว จำนวนถุงละ 1 ชิ้น เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำผลิตภัณฑ์ไปวัดคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางประสาทสัมผัส ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี และกายภาพ

1) ความชื้น วิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธีการของ AOAC (2012)

2) วอเตอร์แอคติวิตี้ (Water Acitivity, a_w) และความชื้น ตามวิธีมาตรฐานของ AOAC (2012)

3) วัดเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์โดยการตัดตัวอย่างเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร วัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (TA.XT plus, USA) ด้วยโปรแกรม Texture Profile Analyzer (TPA) โดยใช้หัวกดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร หรือ P36R ที่ต่อกับ Load cell ขนาด 500 N (นิวตัน) วัดค่าแรงกด (Compression) ที่ความเร็วหัวกด 50 มิลลิเมตร/นาที กดตัวอย่างลึก 5 มิลลิเมตร หรือ 50% ของความสูงตัวอย่าง ดัดแปลงจาก Vilela *et al.* (2016) แล้วบันทึกค่า Hardness, Adhesiveness, Springiness, Cohesiveness, Gumminess และChewiness และวัดค่าสี บันทึกค่าสีในระบบCIE L* a* b* ด้วยเครื่อง Spectophotometer Minolta CM3500d

2.2 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยประเมินความชอบด้านสี (Color) กลิ่นรสเผือก (Taro odor) ความหวาน (Sweetness) ความเหนียว (Stickiness) และความชอบ (Overall liking) ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9-Point hedonic scale) โดยคะแนน 1 หมายถึงไม่ชอบมากที่สุด ถึงคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด ประเมินโดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะคำนวณค่า Duncan's new multiple range test (DMRT) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลอง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการวิเคราะห์คุณภาพของวัตถุดิบ

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวเผือกดิบ และแป้งเผือกสุกบางส่วน โดยใช้เครื่อง RVA (Rapid Visco Analyzer) พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดหรืออุณหภูมิที่เม็ดแป้งพองตัวอย่างรวดเร็ว (Pasting temperature) ของแป้งทั้ง 3 ชนิดแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 1 แป้งเผือกดิบมีค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดมีค่าสูงสุด ตามด้วยแป้งข้าวเหนียวและแป้งเผือกสุกบางส่วน แป้งเผือกดิบเกิดความหนืดช้ากว่าแป้งชนิดอื่น เนื่องจากต้องใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อทำให้แป้งสุกหรือการเจลาติไนซ์ (Gelatinization) รวมถึงเวลาที่เริ่มเกิดความหนืด (Pasting Time) เนื่องจากคุณสมบัติของแป้งดิบจะไม่สามารถละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับหมู่ไฮดรอกซิล ผลคือทำให้แป้งเกิดการพองตัวทำให้เกิดความหนืด (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2550) ส่วนแป้งเผือกสุกบางส่วน จัดเป็นแป้งพรีเจลาติไนซ์สามารถกระจายตัว และละลายได้ในน้ำเย็นและน้ำที่อุณหภูมิห้อง มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีกว่าแป้งดิบ (นิธิยา, 2549) ทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดต่ำกว่าแป้งดิบ จึงสอดคล้องกับการทดลองของ Wadchararat *et al*. (2006) โดยเปรียบเทียบผลระหว่างแป้งข้าวขาวดอกมะลิดิบและสุก พบว่าแป้งข้าวขาวดอกมะลิดิบมีค่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงกว่าแป้งสุก เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) และความหนืดต่ำสุด (Trough viscosity) พบว่าแป้งข้าวเหนียวมีค่าทั้งสองสูงกว่าแป้งชนิดอื่น รวมถึงค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ซึ่งค่าความหนืดสุดท้ายนี้จะบ่งบอกถึงลักษณะของแป้งว่ามีลักษณะเป็นแป้งเปียกหรือเจล เมื่อผ่านการให้ความร้อนและทำให้เย็น (น้ำฝน, 2557) เมื่อพิจารณาในส่วนของแป้งเผือกสุกพบว่ามีค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด และความหนืดสุดท้าย มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแป้งอีก 2 ชนิดที่เหลือ ซึ่งเป็นผลมาจากแป้งเผือกสุกได้ผ่านการเกิดเจลาติไนซ์ทำให้คุณสมบัติด้านความหนืดเปลี่ยนแปลงไป

ค่าการคืนตัว (Setback from trough) พบว่าแป้งเผือกดิบมีค่าสูงกว่าแป้งเผือกสุก โดยแป้งเผือกดิบมีปริมาณอะไมโลโลสอยู่ในช่วง10-13% (Rodriguez *et al*., 2011) มีค่าสูงกว่าแป้งข้าวเหนียว ซึ่งแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลสอยู่ในช่วง 0-1.4% (Na Nakorn *et al*., 2009) โดย Debet *et al*. (2006) กล่าวว่านอกจากอะไมโลส และอะไมโลเพคตินที่มีอยู่ในแป้งแล้ว ปริมาณโปรตีน ไขอาหาร และไขมันก็มีผลต่อค่าการคืนตัว

Table 1 Pasting properties of sticky rice flour, raw taro flour and partially gelatinized taro flour

Treatment	Pasting Temp. (ºC)	Pasting Time (min)	Viscosity (RVU)				
			Peak viscosity	Trough Viscosity	Break down	Final Viscosity	Setback from Trough
Sticky rice flour	74.2±0[b]	5.0[b]	292.3±0.2[a]	155±1.0[a]	24.4±0.6[c]	185.1±0.4[a]	28.0±0.1[a]
Raw taro flour	91.2±0[a]	5.47[a]	142±2.7[b]	102±0[b]	28.4±0.3[b]	131.2±0.2[b]	28.4±0.3[a]
Partially gelatinized taro flour	50.1±0.1[c]	3.4[c]	112.8±1.6[c]	93.7±1.0[c]	29.5±0.2[a]	117.6±0.6[c]	24.5±0[b]

[a-c] Means ± SD with different superscript letters in each column are significantly different ($P \leq 0.05$)

2. ผลของแป้งเผือก และแป้งข้าวเหนียว ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เผือกเคี้ยวหนึบ

2.1 คุณภาพทางเคมีและกายภาพ

จากการวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งเผือกดิบ และจากแป้งเผือกสุกบางส่วน ใน Table 2 และTable 3 ตามลำดับ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใส่แป้งเผือก ค่าความสว่าง (L*) สูงที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากแป้งข้าวเหนียว เมื่อแป้งสุกจึงใสและโปร่งแสง (Na Nakorn *et al*., 2009) จึงให้ค่าความสว่างสูง เมื่อพิจารณาค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) พบว่าแป้งเผือก100% ให้ค่าสูงที่สุดเนื่องจากเป็นอัตราส่วนของแป้งเผือกที่เพิ่มมากขึ้นในระดับสูงสุดรวมทั้งไม่มีส่วนผสมของแป้งข้าวเหนียว และผลของการวัดปริมาณความชื้น พบว่าปริมาณความชื้นสูงอยู่ในช่วง 20-26% และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (a_W) อยู่ในช่วง 0.86-0.89 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเผือกกวนในท้องตลาดซึ่งมีค่า ความชื้นเท่ากับ 25.2% และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เท่ากับ 0.90-0.93 แสดงว่าการกวน และการอบด้วยลมร้อนมีส่วนช่วยในการลดค่าความชื้น และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ได้

Table 2 Effect of raw taro flour content on the physical and chemical properties of chewing taro

Raw taro flour (%)	Moisture (%)	a_w	Color		
			L*	a*	b*
0	24.3±0.6[a]	0.88 ± 0.001[a]	43.3±2.4[a]	1.6 ± 0[e]	4.5 ± 0.3[d]
25	22.9±0.7[b]	0.86 ± 0.001[b]	37.4±1.2[c]	2.6 ± 0.1[d]	5.9 ± 0.6[c]
50	22.7±0.2[b]	0.87 ± 0.001[b]	35.9±1.3[c]	3.8 ± 0.3[c]	6.7 ± 0.8[b]
75	22.5± 0.1[b]	0.87 ± 0.001[b]	37.3±0.9[c]	4.7 ± 0.4[b]	7.1 ± 0.9[b]
100	23.5±0.2[ab]	0.87 ± 0.001[ab]	39.6±1.5[b]	6.5 ± 0.4[a]	9.3 ± 1.1[a]

[a-e] Means ± SD with different superscript letters in each column are significantly different ($P \leq 0.05$)

ผลของแป้งเผือกดิบและแป้งข้าวเหนียวต่อคุณภาพเนื้อสัมผัส ของผลิตภัณฑ์เผือกเคี้ยวหนึบ ดังแสดงใน Table 4 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกดิบส่งผลให้ค่า Hardness ของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกดิบถึง 100% พบว่าค่า Springiness, Gumminess และ Chewiness ให้ค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากอะไมโลสในแป้งเผือก และใยอาหารในแป้งเผือก โดย Alcantara *et al*. (2013) พบว่าแป้งเผือกมีใยอาหาร 3.10% ขณะที่แป้งข้าวเหนียวมี 0.6% (Huang & Lai,

2014) โดยจากงานวิจัยของ Alcantara *et al*. (2013) กล่าวว่าผลิตภัณฑ์เส้นสปาเก็ตตี้ที่เพิ่มใยอาหารจากแป้งเผือก เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกมากขึ้น ส่งผลให้เส้นสปาเก็ตตี้หลังจากต้มให้สุก มีค่า Stickiness เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำที่อยู่ในแป้งเผือก

Table 3 Effect of partially gelatinized taro flour content on the physical and chemical properties of chewing taro

Partially gelatinized taro flour (%)	Moisture (%)	a_w	Color		
			L*	a*	b*
0	24.0±0.1^{c}	0.87±0.001^{b}	43.4±3.7^{a}	1.2±0.1^{d}	5.4±0.5^{b}
25	24.1±0.7^{b}	0.87±0.001^{b}	40.2±1.2^{b}	1.4±0.1^{b}	5.8±0.4^{b}
50	24.6±0.0^{b}	0.87±0.001^{b}	39.5±1.3^{b}	2.2±0.1^{b}	5.8±0.5^{b}
75	25.6±0.0^{a}	0.87±0.001^{b}	40.0±0.9^{b}	4.2±0.1^{a}	9.2±0.5^{a}
100	26.1±0.1^{a}	0.89±0.001^{a}	39.6±1.5^{b}	4.2±0.3^{a}	9.2±0.7^{a}

$^{a-c}$ Means ± SD with different superscript letters in each column are significantly different ($P \leq 0.05$)

Table 4 Effect of taro flour content on the textural properties of chewing taro

Raw taro flour (%)	Textural properties					
	Hardness (N)	Adhesiveness (N)	Springiness (mm)	Cohesiveness	Gumminess (N)	Chewiness (N)
0	270.53±10.2^{e}	-5.94±0.2^{a}	0.99±0^{a}	0.91±0^{a}	246.1±25.6^{d}	228.4±10.0^{d}
25	342.0±11.5^{d}	-7.0±1.9^{a}	0.96±0^{b}	0.86±0^{b}	277.6±2.9^{c}	267.3±3.3^{c}
50	432.5±7.2^{c}	-56.2±2.0^{c}	0.99±0^{a}	0.85±0^{b}	364.3±2.2^{b}	352.9±3.6^{b}
75	597.9±2.5^{b}	-14.9±1.5^{b}	0.88±0^{b}	0.72±0^{c}	427.4±0.2^{a}	392.4±3.7^{a}
100	672.4±9.3^{a}	-15.1±4.2^{b}	0.63±0^{c}	0.56±0^{d}	376.70±0.1^{b}	239.76±17.2^{c}

$^{a-e}$ Means ± SD with different superscript letters in each column are significantly different ($P \leq 0.05$)

ผลของแป้งเผือกสุกบางส่วนและแป้งข้าวเหนียวต่อคุณภาพเนื้อสัมผัส พบว่าเมื่อมีปริมาณแป้งเผือกบางส่วน 100% ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่า Hardness สูงที่สุดแสดงใน Table 5 เนื่องจากความสามารถในการอุ้มน้ำของแป้งพรีเจลาติไนซ์โดย Rodriguez *et al*. (2011) กล่าวว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์ จะมีความสามารถกระจายตัวและละลายได้ในน้ำเย็นและน้ำที่อุณหภูมิห้อง มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีกว่าแป้งดิบ ดังนั้นเมื่อผสมแป้งเผือกสุกบางส่วนกับน้ำ แป้งจะดูดซึมน้ำเข้าไปทำให้แป้งพองตัวทันทีตั้งแต่เริ่มขั้นตอนการผสม และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปอบแห้งแป้งเผือกสุกบางส่วนจะจับน้ำได้ดีกว่าแป้งเผือกดิบ จึงทำให้น้ำตรงส่วนด้านผิวนอกผลิตภัณฑ์ระเหยออกไปได้เร็วกว่าด้านในผลิตภัณฑ์ จึงเกิดเป็นเปลือกแข็งหุ้มที่เรียกว่า Case hardening (Alcantara *et al*., 2013) จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งพรีเจลาติไนซ์จะมีความชื้นสูงกว่าผลิตภัณฑ์จากแป้งเผือกดิบ และเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำผลิตภัณฑ์มาวัดค่า ที่ปริมาณแป้งเผือกสุกบางส่วน 100% จึงให้ค่า Hardness สูงที่สุด แต่พบค่า Adhesiveness และCohesiveness ลดลง เนื่องจากผลของแป้งที่ผ่านการพรีเจลาติไนซ์จะมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีจึงเป็นไปได้ว่า เมื่อกดผิวหน้า

ของผลิตภัณฑ์ทำให้ค่า Hardness สูง แต่ความชื้นยังคงมีอยู่ในตัวผลิตภัณฑ์จึงทำค่า Adhesiveness และ Cohesiveness ลดลง และพบว่าการเพิ่มปริมาณแป้งเผือกสุกบางส่วนทำให้ค่า Springiness ของผลิตภัณฑ์ลดลง เช่นเดียวกับเมื่อเพิ่มแป้งเผือกดิบ แต่ขณะที่ค่า Gumminess และChewiness สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกสุกบางส่วน

Table 5 Effect of partially gelatinized taro flour content on the textural properties of chewing taro

Partially gelatinized taro flour (%)	Textural properties					
	Hardness (N)	Adhesiveness (N)	Springiness (mm)	Cohesiveness	Gumminess (N)	Chewiness (N)
0	270.53±10.2^{e}	-5.94±0.2^{a}	0.99±0^{a}	0.91±0^{a}	246.1±25.6^{d}	228.4±10.0^{d}
25	604.8±17.3^{d}	-21.0±1.9^{a}	0.97±0^{a}	0.92±0^{a}	554.3±20.4^{c}	422.2±2.1^{c}
50	727.6±15.6^{c}	-53.4±9.0^{b}	0.95±0^{b}	0.77±0^{b}	834.1±3.5^{a}	535.7±15.7^{b}
75	1530.1± 9.8^{b}	-67.2± 2.8^{b}	0.62±0^{c}	0.45±0^{d}	732.2±4.3^{b}	471.5±14.6^{c}
100	2209.8±24.3^{a}	-16.5±2.0^{a}	0.86±0^{b}	0.70±0^{c}	832.43±8.7^{a}	731.0±10.5^{a}

$^{a-e}$ Means ± SD with different superscript letters in each column are significantly different ($P \leq 0.05$)

2.2 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เผือกเคี้ยวหนึบ

ผลของแป้งเผือกดิบ และแป้งข้าวเหนียวต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (Table 6) พบว่าเมื่อปริมาณแป้งเผือกดิบเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 50% ส่งผลต่อคะแนนความชอบของ สี กลิ่น รสหวาน ความชอบโดยรวมเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Table 6 และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกเป็น 75 และ100% ผลิตภัณฑ์มีค่าคะแนนความชอบของสี กลิ่น และรสหวาน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่พบว่าเพิ่มปริมาณแป้งเผือกเป็น 100% คะแนนความชอบด้านความเหนียวลดลงจึงทำให้คะแนนความชอบโดยลดลง ซึ่งจากการวัดค่าเนื้อสัมผัสพบว่ามีค่า Hardness สูงสุด (672.4 N) ดังนั้นแป้งเผือกดิบ 50% จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์เผือกเคี้ยวหนึบ

จากการศึกษาผลของแป้งข้าวเหนียว และแป้งเผือกสุกบางส่วน (Table 7) พบว่าการเพิ่มปริมาณแป้งเผือกสุกบางส่วนจาก 0 เป็น 25 และ50% คะแนนความชอบคุณลักษณะด้านสี กลิ่น และความชอบโดยรวมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาจากความชอบของผลิตภัณฑ์โดยรวมที่ทำจาก แป้งเผือกสุกบางส่วน 50, 75 และ100% พบว่าคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น และความหวานเพิ่มขึ้น แต่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกสุกบางส่วนเป็น 100% คะแนนความชอบของความเหนียวลดลง จึงส่งผลให้คะแนนความชอบโดยรวมน้อยกว่าแป้งเผือกสุกบางส่วนที่ 75% ซึ่งเป็นผลมาจากแป้งเผือกสุกบางส่วนเป็นแป้งที่ผ่านการทำให้สุกมาก่อน ทำให้มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกสุกบางส่วนเป็น 100% แป้งเผือกสุกบางส่วนจะดูดน้ำอย่างรวดเร็วและมีเปลือกนอกแข็งเมื่อนำไปอบแห้ง จึงส่งผลต่อคะแนนความชอบด้านความเหนียวลดลง ดังแสดงใน Table 7

เมื่อเปรียบเทียบเพื่อคัดเลือกชนิดของแป้งเผือก สำหรับนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมเผือกเคี้ยวหนึบ แป้งเผือกดิบ 50% เหมาะสมที่สุดเนื่องจากได้คะแนนความชอบของ สี กลิ่น ความหวาน ความเหนียว และคะแนน

ความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลาง (6.1-6.7) ไม่แตกต่างจากสูตรที่มีแป้งเผือกดิบ 75% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ซึ่งอยู่ในระดับที่ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสยอมรับ ดังแสดงใน Table 6

Table 6 Effect of raw taro flour content on the sensory properties of chewing taro

Raw taro flour (%)	Sensory properties				
	Color	Taro odor	Sweetness	Stickiness	Overall liking
0	4.3 ± 1.6^{c}	3.9 ± 1.4^{b}	5.03 ± 1.5^{c}	5.0 ± 1.4^{c}	4.4 ± 1.2^{d}
25	5.5 ± 1.6^{b}	4.4 ± 1.9^{b}	5.8 ± 1.6^{b}	5.9 ± 1.8^{b}	5.1 ± 1.6^{c}
50	6.4 ± 1.2^{a}	6.1 ± 1.1^{a}	6.4 ± 1.4^{a}	6.7 ± 1.0^{a}	6.6 ± 1.2^{a}
75	6.7 ± 0.9^{a}	6.7 ± 0.8^{a}	6.4 ± 1.2^{a}	6.7 ± 1.1^{a}	6.8 ± 1.1^{a}
100	6.2 ± 1.2^{a}	6.3 ± 1.0^{a}	6.2 ± 1.4^{ab}	6.0 ± 1.1^{b}	6.2 ± 1.0^{b}

$^{a-e}$ Means ± SD with different superscript letters in each column are significantly different ($P \leq 0.05$)

Table 7 Effect of partially gelatinized taro flour content on the sensory properties of chewing taro

Partially gelatinized taro flour (%)	Sensory properties				
	Color	Taro odor	sweetness	stickiness	Overall liking
0	4.5 ± 1.7^{c}	4.0 ± 1.7^{c}	6.0 ± 1.6^{a}	5.9 ± 1.9^{a}	5.1 ± 1.7^{c}
25	5.5 ± 1.6^{b}	4.9 ± 1.8^{b}	6.1 ± 1.5^{a}	6.1 ± 1.5^{a}	5.6 ± 1.6^{bc}
50	6.4 ± 1.0^{a}	5.5 ± 1.4^{ab}	6.3 ± 1.3^{a}	6.1 ± 1.2^{a}	6.1 ± 1.3^{ab}
75	6.6 ± 0.7^{a}	6.0 ± 1.3^{a}	6.4 ± 1.2^{a}	5.8 ± 1.1^{a}	6.3 ± 1.1^{a}
100	6.6 ± 1.0^{a}	6.7 ± 1.1^{a}	6.4 ± 1.0^{a}	5.0 ± 1.4^{b}	6.1 ± 1.3^{ab}

$^{a-c}$ Means ± SD with different superscript letters in each column are significantly different ($P \leq 0.05$)

อย่างไรก็ตามคะแนนความชอบโดยรวมพบว่าแป้งเผือกสุกบางส่วน 50 % มีคะแนนอยู่ในระดับชอบปานกลาง (6.1) เช่นเดียวกันกับแป้งเผือกดิบ แต่เพราะราคาวัตถุดิบเผือก และการเตรียมหลายขั้นตอนของแป้งเผือกสุกบางส่วน รวมทั้งโอกาสเกิดเปลือกแข็งของเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ง่าย จึงเลือกวัตถุดิบแป้งเผือกดิบ 50% เป็นส่วนผสมของการทำเผือกเคี้ยวหนึบ ซึ่งจะนำไปพัฒนากระบวนการอบแห้งเพื่อลดความชื้น และปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ต่อไป

สรุป

จากการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เผือกเคี้ยวหนึบ โดยแยกศึกษาอัตราส่วนของแป้งเผือกดิบต่อแป้งข้าวเหนียว และแป้งเผือกสุกบางส่วนต่อแป้งข้าวเหนียว พบว่าคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยการวิเคราะห์ค่า RVA ของแป้งเผือกดิบให้ค่า Pasting temperature, Peak viscosity, Final viscosity และSetback from trough สูงกว่าแป้งเผือกสุกบางส่วน และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกดิบ หรือแป้งเผือกสุกบางส่วนต่อแป้งข้าวเหนียว มีผลทำให้ค่า Hardness และค่า Gumminess ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และมีผลทำให้คะแนนความชอบด้านความเหนียวของผลิตภัณฑ์ลดลง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งเผือกสุกบางส่วนให้ค่า Hardness

มากกว่าทำจากแป้งเผือกดิบ ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมของอัตราส่วนแป้งเผือกดิบ ต่อแป้งข้าวเหนียวในการผลิตเผือกเคี้ยวหนึบคือ 50:50

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2550. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ชนิดา หันสวาสดิ์. 2551. **เคมีของแป้งและแป้งดัดแปร**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

รัมภา ศิริวงศ์. 2552. **ขนมไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ดวงกมลพับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2549. **เคมีอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์โอ เอส พริ้นติ้ง เฮ้าส์, กรุงเทพฯ.

น้ำฝน ลำดับวงศ์. 2557. **การวิเคราะห์แป้งและแป้งดัดแปร**. พิมพ์ครั้งที่1. สำนักพิมพ์ Asia Digital การพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

วิภาวัน จุลยา และรุ่งทิวา วงศ์ไพศาลฤทธิ์. 2553. **50 สูตรทอฟฟี่ ลูกกวาด เยลลี่**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์พิมพ์ดีการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

เสาวภรณ์ วังวรรธนะ. 2554. **ขนมไทย ของหวาน-ของว่าง 108 ชนิด ทำกินได้ ทำขายรวย**. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์ส่งเสริมอาชีพ OTOP, กรุงเทพฯ.

AACC. 2000. **Approved Methods of American Association of Cereal Chemistry**. 10th ed. St. Paul, Minnesota.

Alcantara, R.M., W.A. Hurtada and E.I. Dizon. 2013. The nutritional value and phytochemical components of taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) powder and its selected processed foods. **Nutrition and Food Sciences**. 3 (3): 207.

AOAC. 2012. **Official Method of Analysis**. 19th ed. The Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, Maryland.

Arici, M., R.M. Yildirim, G. Ozulku, B. Yasar and O.S. Toker. 2016. Physicochemical and nutritional properties of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flour as affected by drying temperature and air velocity. **Journal of Food Science and Technology**. 74: 434-440.

FAO. 1999. **Taro Cultivation in Asia and the Pacific**. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

Huang, Y.C. and H.M. Lai. 2014. Characteristics of the starch fine structure and pasting properties of waxy rice during storage. **Food Chemistry**. 152: 432-439.

ICC standard. 1996. **Rapid Pasting Method using the Newport Rapid Visco Analyser**. ICC. Standard method NO. 162. International Association for Cereal Science and Technology, Vienna, Austria.

Kaur, M., P. Kaushal and K.S. Sandhu. 2011. Studies on physicochemical and pasting properties of taro (*Colocasia esculenta* L.) flour in comparison with a cereal, tuber and legume flour. **Journal of Food Science and Technology.** 48: 1-7.

Lee, S.Y. and A. Hamidah. 1997. Some physic-chemical characteristics of taro, sweet potato and potato flours, and their extrudates. **Agronomy Journal.** 25: 77-83.

Na-Nakorn, K., T. Tongdang and P. Sirivongpaisal. 2009. Crystallinity and rheology properties of pregelatinized rice starches differing in amylose content. **Starch/Stärke**. 61: 101-108.

Onwueme, I. 1999. **Taro Cultivation in Asia and the Pacific**. Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand.

Perez, E., F.S. Schulz and E.P.d. Delahaya. 2005. Characterization of some properties of starches from *Xanthosoma sagitti-folium* (tannia) and *Colocasia esculenta* (taro). **Carbohydrate Polymer.** 60: 139-145.

Rodríguez-Miranda, J., I.I. Ruiz-López, E. Herman-Lara, C.E. Martínez-Sánchez, E. Delgada-Licon and M.A. Vivar-Vera. 2011. Development of extruded snacks using taro (*Colocasia esculenta*) and nixtamalized maize (*Zea mays*) flour blends. **Journal of Food Science and Technology.** 44: 673-680.

Vilela, A., C. Sobreira, A.S. Abraao, A.M. Lemos and F.M. Nunes. 2016. Texture quality of candied fruits as influenced by osmotic dehydration agents. **Journal of Texture Studies.** 47: 239-252.

Wadchararat, C., M. Thongngam and O. Navikul. 2006. Characterization of pregelatinized and heat moisture treated rice flours. **Kasetsart Journal (Nat. Sci.)** 40 (Suppl.): 144-153.

แนวทางการพัฒนาชุดบอดี้สูทตามความต้องการผู้ป่วยเด็กโรคสมองพิการ

Guidelines for The Development of Bodysuits for Children with Cerebral Palsy

ชลกร แผลงมน[1*] พิมพวรรณ คุ้มภัย[1] และ ปวริน ตันตริยานนท์[1]

Chonlakorn Plangmon[1*], Pimpawan Kumphai[1] and Pawarin Tuntariyanond[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาความต้องการของผู้ป่วยเด็กโรคสมองพิการและผู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาวิเคราะห์หาแนวทางการพัฒนาชุดบอดี้สูท โดยการค้นคว้าข้อมูล การสังเกตพฤติกรรม อาการป่วยของผู้ป่วยเด็ก และสัมภาษณ์เชิงลึกกับคณะแพทย์ นักกายภาพบำบัด และนักกายอุปกรณ์ ใช้แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้างที่มีคำถามปลายเปิด นำบทสัมภาษณ์มาถอดเทป เรียบเรียงและวิเคราะห์หาความต้องการของผู้ใช้งาน ตามโมเดล Functional Expressive Aesthetic (FEA) ซึ่งเป็นหนึ่งใน Consumer's Need Model และใช้หลักการของ User-Centered Design ซึ่งคำนึงถึงผู้ใช้งานเป็นหลักมาร่วมวิเคราะห์ พบว่าผู้ป่วยที่ควรสวมใส่ชุดบอดี้สูท ได้แก่ ผู้ป่วยเด็กที่มีระดับความรุนแรงของอาการระดับ 3 และ 4 ตาม GMFCS อายุระหว่าง 4-6 ปี มีความต้องการด้านการใช้งานคือเพิ่มความสมดุลของร่างกายและการทรงตัวที่ดีขึ้น สำหรับในด้านการออกแบบเพื่อแสดงตัวตนและความสวยงาม แนวทางที่ควรคำนึงถึงคือความพอดีเมื่อสวมใส่ ความนุ่มของวัสดุที่ใช้ผลิต และการออกแบบที่ส่งเสริมบุคลิกภาพ โดยการออกแบบจะทำขึ้นสำหรับผู้ป่วยแต่ละคนตามอาการนั้นๆเป็นแบบเฉพาะเจาะจง

ABSTRACT

A study of needs of children with Cerebral Palsy and related personal to analyze and develop bodysuit. Data were collected by research, observing patient's illness and behavior and, in-depth interview with the medical team including doctors, physical therapist, and physiotherapists. A semi-structured interview was conducted with open-ended questions, recorded and transcribed. Functional Expressive Aesthetic (FEA) model was used to analyze user needs for user-centered design. There were needs for patients with GMFCS level 3 and 4 aged 4-6 years. The need for function to increase body balance and stability. In terms of design and expressive, the product should reflect wearer's personality, aesthetically pleasing but more importantly comfortable to wear. Therefore, materials must be soft yet strong enough to strengthen body balance and stability. Bodysuit must be customized for each patient.

Key Words: cerebral palsy, bodysuit, consumer's need model

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

[1]ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

จากผลการสำรวจทางสถิติของกรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ พ.ศ.2560 (ข้อมูลสิ้นสุด ณ วันที่ 31 มีนาคม 2560) พบว่า จำนวนประชากรประมาณ 65.5 ล้านคน เป็นผู้พิการประมาณ 1.8 ล้านคน หรือร้อยละ 2.66 ของประชากรทั่วประเทศ ในจำนวนคนพิการทั้งหมด พบว่า เป็นเพศชายมากกว่าเพศหญิง (ร้อยละ 52.86 และร้อยละ 47.14 ตามลำดับ) จากข้อมูลสถิติพบว่าจำนวนผู้พิการมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยความพิการอาจมีสาเหตุมาจากโรคภัยต่างๆ อุบัติเหตุจราจร และการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้สูงอายุ ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของประเทศไทยในอนาคต

หนึ่งในความพิการที่พบมากคือ “โรคสมองพิการ” หรือ “Cerebral Palsy” หรือ “CP” ซึ่งเป็นความผิดปกติเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวและท่าทางของร่างกายที่เกิดจากรอยโรคในสมองใหญ่ (cerebrum) ซึ่งควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อทั่วร่างกาย โรคนี้มักเป็นมาแต่กำเนิด หรือตั้งแต่เล็ก โดยในทารก 1000 คน พบว่ามี 1-3 คน เป็นโรคนี้ ส่วนใหญ่เป็นความพิการที่เกิดตั้งแต่ทารกอยู่ในครรภ์มารดา ไม่ทราบสาเหตุชัดเจน มีอาการและความรุนแรงต่างๆ กันไป ขึ้นอยู่กับลักษณะและตำแหน่งของรอยโรคในสมอง อาการผิดปกติมักพบหลังคลอด ซึ่งจะเริ่มปรากฏให้เห็นตั้งแต่อายุ 6 เดือน และชัดเจนเมื่อ อายุ 1-2 ขวบ สำหรับในเด็กที่สมองพิการเนื่องจากการเจ็บป่วยหรือจากอุบัติเหตุ อาการแสดงมีลักษณะและความรุนแรงที่หลากหลาย แรกเริ่มทารกจะมีพัฒนาการช้ากว่าเด็กปกติ เช่น เริ่มจากการคลาน นั่ง ยืน เดิน และพูดได้ช้ากว่าวัยที่ควร มีความผิดปกติในการเกร็งตัวของกล้ามเนื้อ กล่าวคืออาจแข็งหรืออ่อนตัวกว่าปกติ มีการเคลื่อนไหวและท่าทางผิดปกติ ในบางรายอาจมีระดับสติปัญญาปกติ แต่บางรายอาจมีความบกพร่องทางเชาวน์ปัญญามากน้อยแตกต่างกันไป ความพิการที่เกิดขึ้นจะเป็นอยู่อย่างต่อเนื่องและถาวร แต่หากได้รับการดูแลช่วยเหลืออย่างสม่ำเสมอ ก็อาจช่วย ให้ผู้ป่วยมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น ในผู้ป่วยบางรายที่มีระดับความรุนแรงไม่มาก และได้รับการช่วยเหลือ บำบัดอย่างต่อเนื่อง จะสามารถเรียนหนังสือและทำงานได้เหมือนคนปกติทั่วไป (วรวุฒิ, 2556)

ปัจจุบันผู้ป่วยโรคสมองพิการใช้กายอุปกรณ์เสริม (Orthoses) เพื่อช่วยเสริมในการทำหน้าที่ของอวัยวะที่บกพร่อง เช่น การควบคุมการเคลื่อนไหวที่ผิดปกติ ป้องกันและดัดแก้ความผิดรูป เพิ่มความมั่นคงในการยืนเดิน จัดแนวโครงสร้างร่างกายให้อยู่ในแนวปกติ เป็นต้น พบว่าผู้ป่วยที่ใช้กายอุปกรณ์ในระยะยาว โดยรวมส่งเสริมให้มีคุณภาพชีวิตดีขึ้น ผู้ป่วยมีความเครียดลดลง มีการเดิน และสามารถช่วยเหลือตัวเองได้ดีขึ้น มีสัมพันธภาพกับผู้อื่นดีขึ้น และพบว่าในผู้ป่วยที่ใช้กายอุปกรณ์อย่างต่อเนื่องมีการยอมรับและพึงพอใจต่อการใช้อุปกรณ์เพื่อให้ได้เป้าหมายของการบำบัด ทั้งด้านร่างกายและด้านสัมพันธภาพกับผู้อื่น (อาทิตยา, 2560)

แม้ว่าจะมีผลิตภัณฑ์กายอุปกรณ์เสริมที่ถูกออกแบบมาสำหรับผู้ป่วยโรคสมองพิการ แต่ยังไม่มีอุปกรณ์เสริมในประเทศไทยที่ช่วยพยุงลำตัวเนื่องจากการหดเกร็งของกล้ามเนื้อบริเวณลำตัวได้ ซึ่งอาการและความรุนแรงในผู้ป่วย หากไม่ได้รับการบำบัด จะส่งผลให้สรีระร่างกายค่อยๆเปลี่ยนไป อาจทำให้ไม่สามารถยืนและเดินได้ เนื่องจากกระดูกสันหลังคดงอผิดรูปและมีผลกระทบต่อการดำรงชีวิต

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้องการของผู้ป่วยเด็กโรคสมองพิการเพื่อนำมาเป็นแนวทางและข้อเสนอแนะในการออกแบบผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของชุดบอดี้สูทที่สามารถช่วยประคองร่างกายบริเวณลำตัวของผู้ป่วยให้มีความสมดุลของร่างกาย เพื่อให้ผู้ป่วยสามารถช่วยเหลือตัวเองได้ตามความสามารถ

เครื่องมือและวิธีการ

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร ประชากรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือผู้ที่มีความเกี่ยวข้องกับผู้ป่วยโรคสมองพิการโดยตรง ได้แก่ แพทย์ผู้ชำนาญ นักกายภาพบำบัด นักกายอุปกรณ์ และผู้ปกครองของผู้ป่วย

กลุ่มตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือผู้ที่มีความเกี่ยวข้องกับผู้ป่วยโรคสมองพิการโดยตรง ได้แก่ แพทย์ผู้ชำนาญจำนวน 2 ท่าน นักกายภาพบำบัด จำนวน 1 ท่าน นักกายอุปกรณ์ จำนวน 1 ท่าน และผู้ปกครองของผู้ป่วย จำนวน 2 ท่าน ที่ทำการรักษาอยู่ที่สถาบันสุขภาพเด็กแห่งชาติมหาราชินี

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลใช้การสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้าง (Semi-Structured Interview) คือการสัมภาษณ์ที่มีการวางแผน มีข้อคำถามในการสัมภาษณ์แบบโครงสร้างหลวม (Loosely Structure) เป็นคำถามปลายเปิด และการสัมภาษณ์กลุ่มเฉพาะ (Focus group Interview) ที่เป็นผู้ที่เกี่ยวข้องกับผู้ป่วยโรคสมองพิการ ได้แก่ แพทย์ นักกายภาพบำบัด เป็นต้น บันทึกเทประหว่างการสัมภาษณ์และถอดเทปบันทึกในเอกสารและใช้ซอฟแวร์ Nvivo (Qualitative Data Analysis software) ในการวิคราะห์ความสัมพันธ์ของคำพูดที่มีความเกี่ยวข้องกัน มีการบันทึกประโยคที่มีความสัมพันธ์กัน

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลตามหลักการในโมเดล Functional Expressive Aesthetic (FEA) หนึ่งใน Consumer's Needs Model สำหรับการออกแบบเสื้อผ้าฟังก์ชั่น (Functional Clothing) นอกจากนี้ยังนำหลักการออกแบบ User-Centered Design มาใช้ร่วมวิเคราะห์กลุ่มผู้บริโภค 3 ส่วนหลัก ดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น รูปทรง ขนาดที่เหมาะสมกับการใช้ ความสวยงาม ฯลฯ
2. จิตวิทยาในการตอบสนอง เช่น ความพึงพอใจในการใช้งาน ความรู้สึกที่ดีในงานบริการ
3. ประเพณี และวัฒนธรรม ที่มีผลทั้งทางตรงและทางอ้อม ในการสร้างเรื่องราวให้เกิดขึ้นบนตัวผลิตภัณฑ์

Functional Expressive Aesthetic (FEA) Model

โมเดล Functional Expressive Aesthetic หรือ FEA เป็นหนึ่งใน Consumer Needs Model ที่ใช้สำหรับการออกแบบเสื้อผ้าฟังก์ชั่น (Functional clothing) (Figure 2) สร้างขึ้นโดย Lamb and Kallal ในปี ค.ศ. 1992 โดยมีหลักการสำคัญคือ การใช้ความต้องการจากผู้ใช้งาน (User) เป็นหลักการออกแบบ ซึ่งจำแนกการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบเป็น 3 ด้าน ได้แก่ การใช้งาน (Function) การแสดงตัวตน (Expressive) และความสวยงาม (Aesthetic) ในแต่ละด้านจะมีประเด็นต่างๆที่นำมาวิเคราะห์ ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์และความต้องการของผู้ใช้งานถึงความสำคัญในแต่ละประเด็น

Figure 2 The Functional-Expressive-Aesthetic (FEA) model of consumer needs (Lamb & Kallal, 1992)

ผลและวิจารณ์การสำรวจ

ผลการศึกษาอาการของผู้ป่วยโรคสมองพิการ

จากการศึกษาอาการของผู้ป่วยโรคสมองพิการ พบว่าอาการของผู้ป่วยสามารถจำแนกได้ ดังนี้

1. โรคสมองพิการชนิดหดเกร็งหรือกลุ่มแข็งเกร็ง (Spastic)

โรคสมองพิการชนิดหดเกร็ง หรือที่เรียกว่า Spastic CP พบได้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 50- 75 ของผู้ป่วยทั้งหมด โดยจะมีความตึงตัวของกล้ามเนื้อมากผิดปกติ สามารถจำแนกเป็นกลุ่มตามส่วนของร่างกายที่ผิดปกติออกเป็นหลายประเภท ได้แก่

1.1. โรคสมองพิการชนิดหดเกร็งประเภทครึ่งซีก (Spastic hemiplegia) เป็นประเภทที่พบมากที่สุดในบรรดาผู้ป่วยเด็กโรคสมองพิการชนิดหดเกร็ง มีอาการของแขนและขาข้างเดียวกัน โดยมักเป็นที่แขนมากกว่าขา เห็นลักษณะท่าทางของแขนที่ผิดปกติชัดเจน คือ มีการงอของข้อศอก แขนคว่ำ ข้อมือและนิ้วงอ ส่วนที่ขาจะเดินเท้าจิกลง

1.2. โรคสมองพิการชนิดหดเกร็งประเภทครึ่งท่อน (Spastic diplegia) มีอาการของขาและแขนทั้ง 2 ข้าง โดยขา 2 ข้างมีอาการมากกว่าแขน ผู้ป่วยจะเดินเกร็งเท้าจิกลงหรือไขว้กัน ส่วนที่แขนพบมีเพียงความตึงตัวของกล้ามเนื้อหรือปฏิกิริยารีเฟล็กซ์ที่ไวกว่าปกติ

1.3. โรคสมองพิการชนิดหดเกร็งประเภททั้งตัว (Spastic quadriplegia) มีอาการของแขนขาทั้งหมด โดยขา 2 ข้าง มีอาการมากกว่าแขน และในส่วนของแขนมีความผิดปกติให้เห็นชัดเจน เกิดจากพยาธิสภาพในสมองที่ใหญ่และรุนแรง มักจะมีความผิดปกติในส่วนอื่นของร่างกายร่วมด้วย รวมทั้งปัญหาการดูด กลืนและการพูด

2. โรคสมองพิการชนิดยุกยิกหรือกลุ่มที่มีการเคลื่อนไหวที่เกิดขึ้นเอง (Athetoid)

โรคสมองพิการชนิดยุกยิก หรือที่เรียกว่า Athetoid CP (Dyskinetic CP) พบได้ร้อยละ 10-20 ของผู้ป่วยทั้งหมด มีอาการตึงตัวของกล้ามเนื้อเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและไม่แน่นอน ทำให้ควบคุมการเคลื่อนไหวไม่ได้ มักพบอาการที่แขนมากกว่าขา บางรายมีการเคลื่อนไหวอย่างช้าๆ ของกล้ามเนื้อส่วนปลายแขน รวมทั้งใบหน้า (Athetosis) บางรายมีการเคลื่อนไหวของใบหน้าและกล้ามเนื้อส่วนปลายแขนอย่างรวดเร็ว และไม่เป็นจังหวะสม่ำเสมอ (Chorea)

3. โรคสมองพิการชนิดเดินเซหรือกลุ่มที่มีการเคลื่อนไหวที่เกิดขึ้นเอง (Ataxic)

โรคสมองพิการชนิดเดินเซ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Ataxic CP พบได้ร้อยละ 5-10 ของทั้งหมดโดยมีอาการสูญเสียความสามารถในการทรงตัวและการรับรู้ระดับสูง-ต่ำ การทำงานประสานกันของกล้ามเนื้อแขนขาอาจบกพร่องอย่างรุนแรง ลักษณะการเดินไม่มั่นคงและเท้าทั้งสองแยกห่างออกจากกัน

นอกจากนี้การทางแพทย์ได้จำแนกอาการของผู้ป่วยโรคสมองพิการเป็น 5 กลุ่ม ตาม Gross Motion Functional Classification System (GMFCS) ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งเป็นการจำแนกตามความสามารถในการเคลื่อนไหวของผู้ป่วยอย่างกว้าง การจัดกลุ่มผู้ป่วยตาม GMFCS สามารถจัดได้ตั้งแต่ผู้ป่วยมีอายุ 1 ปีครึ่ง ไปจนถึงอายุ 12 ปี โดยระดับที่ 1 เป็นระดับที่มีความสามารถในการเคลื่อนไหวมากที่สุด ผู้ป่วยสามารถเดินได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือใดช่วยเหลือ สามารถขึ้นบันไดโดยไม่ต้องใช้มือจับราวบันได ในขณะที่ระดับที่ 2 ต้องใช้มือช่วยจับราวบันได แต่ยังสามารถเดินขึ้นได้ด้วยตัวเอง สำหรับระดับที่ 3 ต้องมีเครื่องมือช่วยในการทรงตัวไม่ว่าจะเป็นการยืนหรือเดิน เมื่อเดินทางไกลต้องพึ่งรถเข็น แต่ยังสามารถใช้มือของตัวเองพารถเข็นไปได้ และในระดับที่ 4 ต้องใช้เครื่องช่วยเกาะทรงตัวขนาดใหญ่ และสามารถเดินได้ในระยะทางสั้นๆ และจำเป็นต้องใช้รถเข็นไฟฟ้าหรือให้คนอื่นช่วยในการเดินทาง และระดับสุดท้ายคือระดับที่ 5 ซึ่งเป็นระดับที่อาการหนักที่สุด คือไม่สามารถทรงตัวได้ เวลานั่งหลังมีความค่อมงอ ต้องใช้สายรัดลำตัวไว้กับรถเข็น และจำเป็นต้องมีคนอื่นช่วยเสมอ (เรือนแก้ว, ม.ป.ป.)

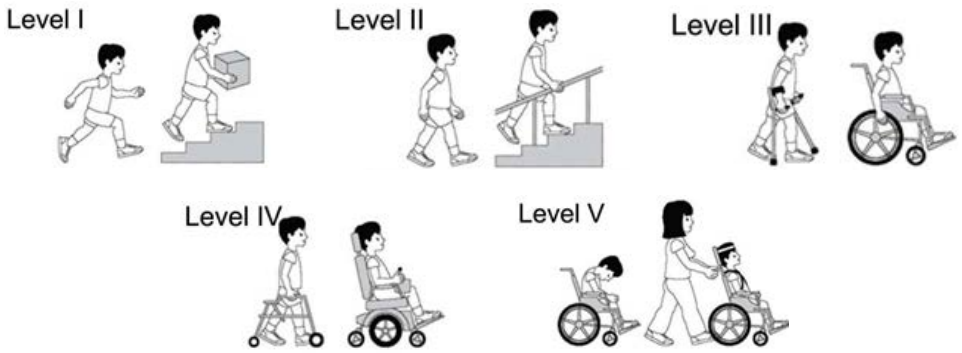


Figure 1 Gross Motion Functional Classification System (GMFCS) (Dev Med Child Neurol, 1997)

อาการของผู้ป่วยประเภทต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ยังสามารถเกิดปัญหาและความผิดปกติอื่นร่วมด้วยได้ เช่น ภาวะปัญญาอ่อน ลมชัก ปัญหาด้านการมองเห็นและการได้ยิน และด้านกระดูก มักจะพบการหลุดออก (dislocation) หรือการเคลื่อนออกจากที่บางส่วน (subluxation) ของข้อต่อต่างๆของร่างกาย เช่น ข้อสะโพก ข้อไหล่ เป็นต้น ซึ่งหากไม่ได้รับการรักษาอย่างถูกต้องและเพียงพอ อาจส่งผลให้เกิดภาวะกระดูกสันหลังคด (scoliosis) ตามมา เนื่องจากอาการหดเกร็งของกล้ามเนื้อจะรุนแรงขึ้นตามลำดับและส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีระร่างกาย โดยเฉพาะกับผู้ป่วยเด็กที่กำลังเจริญเติบโต อาจมีผลในเรื่องของพัฒนาการร่วมด้วย เช่น การขาดสารอาหารเนื่องจากการทานอาหารได้น้อย เป็นต้น

ผลการสังเกตและสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้อง

การสังเกตการณ์อาการของผู้ป่วยเด็กที่มาทำการรักษาและทำกายภาพบำบัดที่สถาบันสุขภาพเด็กแห่งชาติมหาราชินี และพูดคุยกับผู้ปกครอง พบว่าผู้ป่วยเด็กแต่ละคนมีระดับความรุนแรงของอาการต่างกันและอาการป่วยมีความเป็นปัจเจกบุคคล เนื่องจากโรคสมองพิการเป็นโรคที่เกิดจากความผิดปกติของสมอง อาการของโรคจึงแตกต่างกันไปตามตำแหน่งและระดับความเสียหายของสมองที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอาการหดเกร็งกล้ามเนื้อของผู้ป่วยเกิดขึ้นตลอดเวลา เนื่องจากกล้ามเนื้อของผู้ป่วยทำงานอยู่นอกเหนืออำนาจจิตใจ แต่หากได้รับการกายภาพบำบัดที่ถูกต้องและมีความต่อเนื่อง จะสามารถลดการหดเกร็งได้บ้างตามระดับอาการและการฝึกฝนของผู้ป่วยเอง

การสัมภาษณ์แพทย์ นักกายภาพบำบัด และนักกายอุปกรณ์ พบว่าผู้ใช้งาน (User) ควรเป็นผู้ป่วยเด็กโรคสมองพิการ ชนิด Spastic ประเภท Spastic hemiplegia และ Spastic quadriplegia ที่มีความรุนแรงของอาการระดับ 3 และ 4 ตาม GMFCS อายุระหว่าง 4-6 ปี เนื่องจากผู้ป่วยเด็กทั้ง 2 ประเภทนี้มีปัญหาในช่วงลำตัวค่อนข้างมาก มีอาการเกร็งของแขนและขาข้างเดียวกัน โดยแขนเป็นมากกว่าขา เห็นลักษณะท่าทางของแขนที่ผิดปกติชัดเจน จึงเป็นกลุ่มผู้ป่วยที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ชุดบอดี้สูทเข้ามาช่วยบำบัด สำหรับด้านฟังก์ชั่นการใช้งาน ควรมุ่งเน้นในเรื่องของความสมดุลของร่างกาย (Body balance) เพื่อช่วยให้สรีระช่วงลำตัวของผู้ป่วยเด็กที่มีอาการหดเกร็งถูกประคองอยู่ในท่าที่ถูกต้อง และการคงรูปร่าง (Stability) ให้มีความถูกต้องตามปกติมากที่สุด โดยกำหนดเวลาการสวมใส่อยู่ที่ 6 ชั่วโมงต่อวัน และสวมใส่ในช่วงเวลากลางวันเท่านั้น

อีกประเด็นหนึ่งที่นำมาพิจารณาคือคุณสมบัติทางกายภาพของชุดบอดี้สูทในด้านต่างๆ คือ วัสดุที่นำมาใช้ควรมีความนุ่ม (Comfort) และความสบาย สามารถสวมใส่ติดต่อกันได้เป็นเวลานาน ในเรื่องของความพอดีตัว (Fit) ที่จะต้องมีความยืดหยุ่นของเนื้อผ้าที่เหมาะสม ไม่รัดหรือย้วยจนเกินไป และเรื่องอื่น ๆ เช่น การระบายอากาศ การทนต่อแรงกระทำต่างๆ เป็นต้น ประเด็นสุดท้ายคือเรื่องบุคลิกภาพ (Personality) ที่มีความสำคัญต่อผู้ป่วยเด็ก เนื่องจากผู้พิการส่วนใหญ่ไม่ต้องการสวมใส่กายอุปกรณ์เทียมที่ทำให้ตนรู้สึกแตกต่างจากคนอื่น ดังนั้นการออกแบบชุดบอดี้สูทจะต้องเป็นชุดที่ซ่อนและเรียบเนียนไปกับเสื้อผ้าปกติ หรืออาจเพิ่มลวดลายที่สวยงามเพื่อให้ผู้ป่วยเด็กรู้สึกอยากสวมใส่มากขึ้น

เมื่อนำ Functional Expressive Aesthetic (FEA) ซึ่งเป็นหนึ่งใน Consumer Needs Model สำหรับ functional clothing มาใช้วิเคราะห์ความต้องการของผู้ป่วยและผู้ที่เกี่ยวข้อง พบว่าสามารถสรุปได้เป็นแผนภาพดังนี้

Figure 3 แสดงให้เห็นถึงความต้องการของผู้ใช้งานที่วิเคราะห์โดยใช้ Functional Expressive Aesthetic (FEA) มาเป็นเครื่องมือ ทำให้ทราบถึงความต้องการของผู้ใช้งานในด้าน Functional, Aesthetic และ Expressive ที่เป็นเชิงลึก พบว่ามี 6 หัวข้อสำคัญที่เกี่ยวข้องกับชุดบอดี้สูท ได้แก่ ฟังก์ชั่น (Functional), ความพอดี (Fit) ความนุ่ม (Comfort) การออกแบบ (Design elements) สี (Color) และบุคลิกภาพ (Personality) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์กันดังภาพข้างต้น

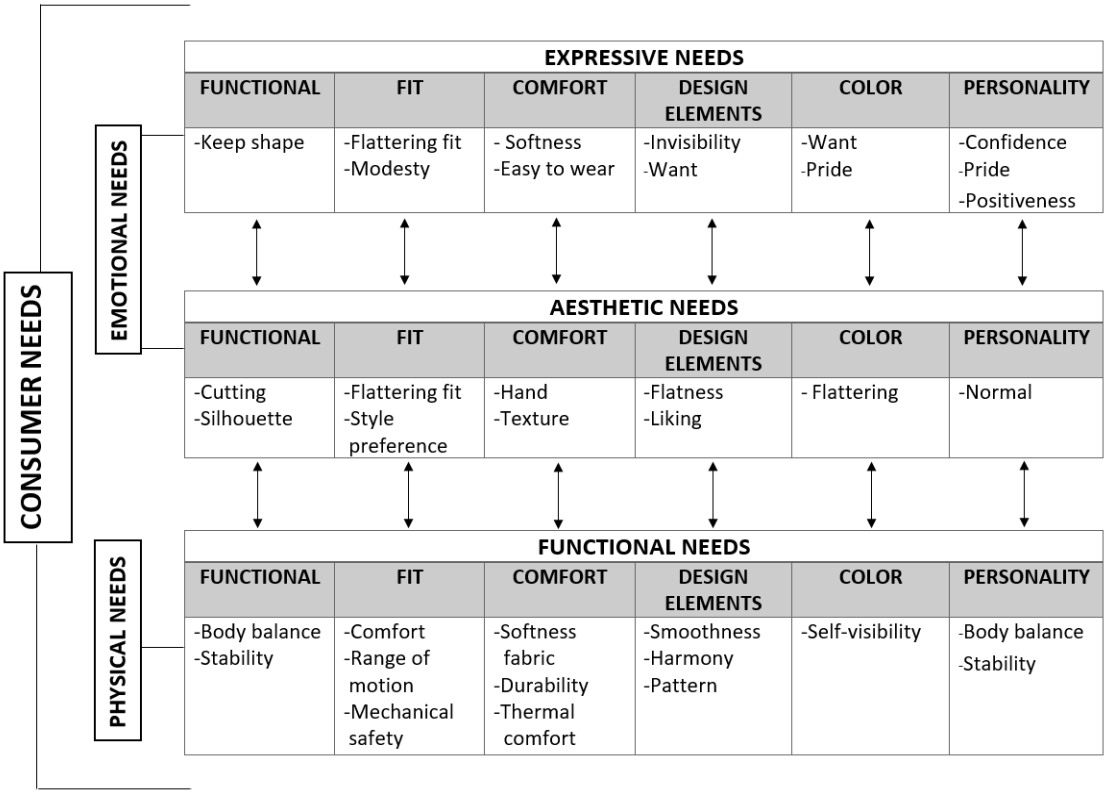


Figure 3 Bodysuit needs model for children with cerebral palsy

ด้านฟังก์ชั่น (Functional) พบว่ามีความต้องการในเรื่องความสมดุลของร่างกายและการทรงตัว โดยต้องให้ความสำคัญกับการตัดเย็บและรูปทรงของชุดบอดี้สูท เพื่อประคองสรีระในช่วงลำตัวที่มีปัญหาการหดเกร็งให้แสดงอาการน้อยลง ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้ในการตัดเย็บต้องมีความยืดหยุ่นสูง และมีวัสดุโครงเสริมที่แข็งแรงในชุดบอดี้สูทที่ทำหน้าที่ประคองช่วงลำตัว เช่น ผ้าพาวเวอร์เน็ต (Power net) ที่ทำมาจากเส้นใยไนลอน (Nylon) ผสมสเปนเด็กซ์ (Spandex) ที่มีความยืดหยุ่นคงที่ เวลาสวมใส่จะแนบกับลำตัวได้ดีไม่ว่าจะขยายออกเท่าไหร่จะหดกลับได้เท่าเดิม ซึ่งจะมีประโยชน์ในเรื่องของการเคลื่อนไหว ระบายอากาศได้ดี และแผ่นโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) เป็นวัสดุในการประคองร่างกายให้มีความสมดุลและการทรงตัวที่ดีขึ้น เนื่องจากเป็นพลาสติกที่เบา แข็งแรง ไม่เสียรูปง่าย และทนทานต่อการขีดข่วน ด้วยคุณสมบัติเด่น ที่สามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 165

องศาเซลเซียส โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) จึงนิยมนำมาใช้ทำเป็นเครื่องมือทางการแพทย์ที่เป็นพลาสติก เนื่องจากสามารถนำไปอบเพื่อฆ่าเชื้อได้

ด้านความพอดี (fit) พบว่าผู้ป่วยต้องการความพอดีตัว ในระดับที่ไม่ทำให้เกิดความอึดอัดระหว่างสวมใส่ เบา สบาย ไม่ขัดขวางการเคลื่อนไหวและเคลื่อนที่ และมีความปลอดภัยต่อแรงที่ชุดกระทำบนร่างกายของผู้ป่วย ซึ่งอาจใช้เทคนิคการเย็บตะเข็บมาช่วยในการเสริมหรือผ่อนแรงในส่วนที่ต้องการ เพื่อให้เกิดความพอดีลำตัวและเพื่อความสบายในการสวมใส่ ส่วนในเรื่องความสบาย (comfort) บอดี้สูทควรมีผิวสัมผัสนุ่ม เรียบเนียน สวมใส่ง่ายและสะดวกสบาย ระบายอากาศได้ดี มีความทนทานต่อการใช้งานและการดูแลรักษา

ด้านการออกแบบ (design elements) ที่ผู้ป่วยไม่ต้องการให้ผู้อื่นมองเห็นชุดบอดี้สูท ไม่ต้องการให้เห็นว่าตนแปลกหรือต่างจากคนอื่น เนื่องจากจะทำให้เกิดความไม่มั่นใจ จึงต้องออกแบบให้ชุดบอดี้สูทมีความเรียบเนียนไปกับร่างกาย และไม่มีส่วนที่แสดงออกมาให้เห็นเมื่อผู้ป่วยสวมใส่เสื้อผ้าปกติทับลงบนชุดบอดี้สูท นอกจากนี้ชุดบอดี้สูทยังต้องมีลวดลายที่ดึงดูดใจผู้ป่วยเด็ก ทำให้ผู้ป่วยเด็กรู้สึกอยากสวมใส่ชุดอีกด้วย ในหัวข้อสี (color) พบว่า ผู้ป่วยต้องการชุดบอดี้สูทที่มีสีสันที่ตนเองชอบ เนื่องจากผู้ป่วยจะเกิดความภูมิใจในชุดที่ตนเองใส่ โดยสีสันและลวดลายของชุดอาจอ้างอิงมาจากการ์ตูนที่กำลังได้รับความนิยมในขณะนั้น และในหัวข้อสุดท้ายคือเรื่องของบุคลิกภาพ (Personality) ที่เป็นเรื่องสำคัญมาก เนื่องจากผู้พิการมักมีความคิดในเชิงลบต่อตนเองและคิดว่าตนเองแตกต่างจากคนอื่น การจะทำให้ผู้พิการยอมรับในชุดบอดี้สูทจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องบุคลิกภาพหลังการสวมใส่ เพื่อให้ผู้ป่วยเด็กโรคสมองพิการเกิดความมั่นใจ เกิดการนับถือตนเอง และมีทัศนะคติในเชิงบวกในการใช้ชีวิต โดยเรื่องที่ต้องให้ความใส่ใจยังคงเป็นความสมดุลของร่างกายและการทรงตัวที่ดีขึ้น

สรุป

ชุดบอดี้สูทเป็นกายอุปกรณ์เสริมชนิดหนึ่งที่สามารถช่วยลดความหดเกร็งของกล้ามเนื้อลำตัวของผู้ป่วยเด็กโรคสมองพิการได้ จากการสำรวจความต้องการของผู้ใช้งานและผู้ที่เกี่ยวข้องพบว่าแนวทางการออกแบบชุดบอดี้สูทที่ดีและตรงตามความต้องการทั้งทางการแพทย์และผู้สวมใส่นั้นไม่ได้อยู่บนพื้นฐานของเรื่องการบำบัดเพียงด้านเดียว ความเหมาะสมในการออกแบบตามหลักการของ Functional Express Aesthetic (FEA) ประกอบด้วย ด้านของฟังก์ชั่น (functional) โดยมุ่งเน้นให้ชุดบอดี้สูทมีคุณสมบัติในการประคองลำตัวของผู้ป่วยให้เกิดความสมดุลทางร่างกายและการทรงตัวอย่างมีประสิทธิภาพแบบเฉพาะบุคคล ความพอดี (fit) กับร่างกายเพื่อให้เกิดความสะดวกสบายและไม่รู้สึกอึดอัดเมื่อสวมใส่เป็นเวลานาน ความนุ่ม (comfort) ของเนื้อผ้าเพื่อไม่ให้เกิดความระคายเคืองต่อผิว ซึ่งวัสดุที่ควรนำมาเป็นวัสดุหลักในการตัดเย็บได้แก่ ผ้าพาวเวอร์เน็ต (power net) และพลาสติกโพลีโพพิลีน (Polypropylene) ด้านการแสดงตัวตน (expression) เน้นด้านบุคลิกภาพ (personality) การออกแบบที่ส่งเสริมบุคลิกภาพที่ดีของผู้ป่วยหลังสวมใส่ชุดบอดี้สูท เพื่อเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้ป่วยเด็ก ด้านความสวยงาม (aesthetic) เน้นการออกแบบ (design elements) ที่ให้ความสำคัญกับความสวยงามและการซ่อนชุดบอดี้สูทไม่ให้ถูกมองเห็นเมื่อสวมเสื้อผ้าปกติทับไว้ สี (color) ที่ดึงดูดใจผู้ป่วยเด็กโรคสมองพิการให้รู้สึกอยากสวมใส่ชุดบอดี้สูท

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์จากคณะแพทย์ นักกายภาพบำบัด และนักกายอุปกรณ์ ประจำสถาบันสุขภาพเด็กแห่งชาติมหาราชินี ที่สละเวลาอันมีค่าในการให้สัมภาษณ์และอนุญาตให้สังเกตการณ์อาการของผู้ป่วยเด็กอย่างใกล้ชิด

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ. 2560.**รายงานข้อมูลสถานการณ์ด้านคนพิการในประเทศไทย**. แหล่งที่มา: http://dep.go.th/sites/default/files/files/news/สถานการณ์คนพิการ_มิถุนายน 2560.pdf, 20 สิงหาคม 2560.

เรือนแก้ว กนกพงศ์ศักดิ์ และคณะ. ม.ป.ป.. **เด็กสมองพิการ (ซี พี)**. แหล่งที่มา: http://rajanukul.go.th/new/index.php?mode=academic&group=269&id=3231&date_start=&date_end, 20 สิงหาคม 2560.

วรวุฒิ เจริญศิริ. 2556. 10 สิงหาคม. **โรคสมองพิการ (Cerebral Palsy)**. แหล่งที่มา: http://www.bangkokhealth.com/index.php/health/health-system/brain/1819-โรคสมองพิการ-cerebral-palsy.html, 20 สิงหาคม 2560.

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. **กายอุปกรณ์**. แหล่งที่มา: https://th.wikipedia.org/wiki/กายอุปกรณ์, 20 สิงหาคม 2560.

อาทิตยา. 2557. 23 พฤษภาคม. **กายอุปกรณ์สำหรับเด็กโรคสมองพิการ**. แหล่งที่มา: http://artitayacenter.blogspot.com/2014/05/blog-post.html, 20 สิงหาคม 2560.

อาทิตยา. 2560. 8 กุมภาพันธ์. **ทำไมorthosisจึงจำเป็นกับเด็กโรคสมองพิการ**. แหล่งที่มา: http://artitayacenter.blogspot.com/2017/02/orthosis.html, 20 สิงหาคม 2560.

Berker, Nadire and Yalcin, Selim. **The HELP Guide To Cerebral Palsy**. 2 nd ed. Washington, USA: Merrill Corporation. 2010.

Bower, E. (2008). **Finnie's handling the young cerebral palsied child at home**. Woburn, Massachusetts: Butterworth-Heinemann Medical.

ผลของโปรตีนไอโซเลตจากถั่วและไข่ขาวผงต่อสมบัติของเส้นบะหมี่จากแป้งข้าว

Effect of Pea Protein Isolate and Egg White Powder on the Properties of Alkaline Rice Noodles

ศรสวรรค์ ชมเชย[1] และ มาศอุบล ทองงาม[1*]

Sornsawan Chomchoey[1] and Masubon Thongngam[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้โปรตีนไอโซเลตจากถั่ว (PPI) และไข่ขาวผง (EWP) ต่อสมบัติของเส้นบะหมี่จากแป้งข้าว โดยใช้แป้งข้าวผสมกับโปรตีน PPI และ EWP ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน ดังนี้ 5, 10, 15 และ 20% จากงานวิจัยพบว่าเส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่มีปริมาณ PPI เพิ่มขึ้นจะมีค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ในขณะที่เส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่มีปริมาณ EWP เพิ่มขึ้นมีค่า L^*เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบสมบัติด้านการหุงต้มของเส้นบะหมี่พบว่า เส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่เติม PPI 15 และ 20% มีค่าการสูญเสียระหว่างการหุงต้ม (Cooking loss) ใกล้เคียงกันแต่มีค่าสูงกว่าตัวอย่างอื่น ในขณะที่เส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่เติม EWP มีค่าการสูญเสียระหว่างการหุงต้มไม่แตกต่างจากบะหมี่จากแป้งข้าวและแป้งสาลี เมื่อตรวจสมบัติด้านเนื้อสัมผัสพบว่าเส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่เติม PPI 10% มีค่าความแน่นเนื้อสูงที่สุด ในขณะที่เส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่ไม่มีการเติมโปรตีนมีค่าความแน่นเนื้อต่ำที่สุด นอกจากนี้ เส้นบะหมี่มีค่าแรงดึงสูงสุดแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ระยะทางในการดึงมีค่าแตกต่างกันโดยพบว่าเส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่มีการเติม PPI 5% มีระยะทางในการดึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติม PPI เป็น 20% ส่งผลที่ไม่ดีต่อเส้น ทำให้เส้นดึงขาดได้ง่ายขึ้น

ABSTRACT

This research aims to study the effect of pea protein isolate (PPI) and egg white powder (EWP) on the alkaline rice noodle properties by using composite rice flour with the addition of various concentrations of PPI and EWP (5, 10, 15 and 20%). The results showed that the L* value of alkaline rice noodle with PPI was lowered with the increasing PPI concentrations; while that of alkaline rice noodle with EWP was increased with the increasing EWP concentration. In addition, the cooking properties were investigated. The results showed that the cooking loss of alkaline rice noodle with 15 and 20% PPI was not significantly different but higher than other conditions. However, the cooking loss of alkaline rice noodle with EWP was similar to that of wheat alkaline noodle and alkaline rice noodle with no protein. Furthermore, the firmness of alkaline rice noodle with 10% PPI was the highest but the alkaline rice noodle without the addition of protein was the lowest. When the tensile strength and distance (extension) of noodles were compared, the results showed that the maximum force of alkaline rice noodle were slightly different. However, the distance of alkaline rice noodle with 5%PPI increased; while that of alkaline rice noodles with 20%PPI cause the inferior effect.

Key Words: alkaline rice noodles, egg white powder, pea protein isolate

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

[1] ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

บทนำ

ชาวเอเชียนิยมบริโภคบะหมี่เป็นอาหารหลักในมื้อกลางวันเป็นส่วนใหญ่ (ชุลีกร, 2549) บะหมี่มีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายและสามารถนำมาปรุงเป็นอาหารได้หลากหลายเมนู วัตถุดิบหลักที่ใช้ผลิตบะหมี่ประกอบไปด้วย แป้งสาลี น้ำ เกลือ และด่าง ซึ่งการใช้แป้งสาลีที่มีกลูเตนเป็นโปรตีนหลักในข้าวสาลีอาจมีความเสี่ยงต่อผู้บริโภคบางกลุ่มได้ ซึ่งผู้ที่ป่วยเป็นโรคภูมิแพ้ (Coeliac disease) จะมีอาการปวดท้องอย่างรุนแรงเมื่อรับประทานกลูเตน (ชุลีกร, 2549) ข้าวเป็นธัญชาติชนิดหนึ่งที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตอาหารปราศจากกลูเตนเนื่องจากสามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ง่ายและไม่มีกลูเตน (Kim *et al*., 2014) ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้ข้าวมาทดแทนแป้งสาลี แต่ผลิตภัณฑ์จากข้าวนั้นมีคุณภาพที่ด้อยกว่าผลิตภัณฑ์จากข้าวสาลี (Yalcin and Basman, 2008) ไม่ว่าจะเป็นคุณภาพการหุงต้ม (cooking properties) หรือคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส (textural properties) ซึ่ง Detchewa *et al*., (2012) ได้ทำการวิจัยสปาเกตตี้จากแป้งข้าวพบว่า สปาเกตตี้จากแป้งข้าวนั้นมีคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและคุณภาพด้านการหุงต้มต่ำกว่าสปาเกตตี้จากแป้งสาลีเนื่องจากขาดโครงร่างตาข่ายของกลูเตนและการเติมโปรตีนในผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตนสามารถช่วยเสริมสารอาหารและช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ได้ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการผลิตเส้นบะหมี่จากแป้งข้าวสายพันธุ์ขาวตาแห้งและสายพันธุ์ขาวดอกมะลิสามารถนำมาใช้ในการผลิตเส้นบะหมี่ได้ (Alkaline Rice Noodle) เส้นบะหมี่ที่ได้มีลักษณะเปราะขาดง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะเติมโปรตีนลงไปในสูตรของบะหมี่จากแป้งข้าว เพื่อเพิ่มโปรตีนให้เป็นโครงสร้างตาข่ายเพื่อช่วยให้เส้นมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น จึงศึกษาผลของการเติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วหรือไข่ขาวผงต่อสมบัติด้านการหุงต้ม และสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่จากแป้งข้าว

อุปกรณ์และวิธีการ

การผลิตแป้งข้าว

นำข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และขาวตาแห้ง17 มาผ่านการโม่เปียก และร่อน ซึ่งดัดแปลงวิธีการจากอรพรรณ (2547) โดยแยกสิ่งแปลกปลอมออกจากเมล็ดข้าวแล้วล้างด้วยน้ำให้สะอาด จากนั้นนำข้าวมาแช่น้ำทิ้งไว้ 4 ชั่วโมง นำข้าวไปโม่ด้วยเครื่องโม่หินไฟฟ้า (Colloid mill) ส่วนน้ำแป้งที่ได้จากการโม่ใส่ในถุงผ้าดิบในเครื่องปั่นเหวี่ยง (Basket centrifuge) หลังจากนั้นทำแป้งที่ได้ทำให้เป็นก้อนขนาดเล็กๆแล้วเกลี่ยให้กระจายในถาดจากนั้นนำไปอบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิ 45±5 °ซ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง บดละเอียดด้วยเครื่องลดขนาด (Rotor mill) จากนั้นร่อนแป้งผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช บรรจุแป้งในถุงพอลิเอทิลีน แล้วปิดปากถุง เก็บที่อุณหภูมิ -18 °ซ

การเตรียมบะหมี่จากแป้งข้าว (ดัดแปลงจาก ชุลีกร, 2549)

นำแป้งผสม ผสมกับแป้งมันสำปะหลังพรีเจล จากนั้นนำสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เกลือและน้ำมันพืช นวดผสมให้เข้ากันจนได้ก้อนโด พักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 20 นาที แล้วนำมาผ่านเครื่องอัดรีดให้เป็นแผ่น และนำมาตัดเป็นเส้นให้มีความหนาขนาด 1.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปเข้าอบให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 35 °ซ จนได้ความชื้นของเส้นบะหมี่ต่ำกว่าร้อยละ 12 โปรตีนไอโซเลตจากถั่ว; PPI หรือ โปรตีนไข่ขาว; EWP เติมพร้อมกับแป้งในส่วนผสม โดยเติมโปรตีนที่ความเข้มข้นต่างๆกัน ดังนี้ 5, 10, 15 และ 20%

การตรวจสอบสมบัติของเส้นบะหมี่

ค่าพีเอชของเส้นบะหมี่

นำเส้นบะหมี่ปริมาณ 10 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ผสมโดยใช้เครื่องปั่นเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมาวัดค่าพีเอชของเส้นบะหมี่ ดัดแปลงจาก Shelke *et al*. (1990)

ค่าสีของเส้นบะหมี่

ตรวจวัดค่าสีของเส้นบะหมี่สุกโดยใช้เครื่องวัดสี (Hunter Lab Model Miniscan XE) วัดค่าสี L*, a* และ b* ในระบบ CIE ดัดแปลงจาก Hsu *et al*. (2003)

สมบัติด้านการหุงต้ม (AACC, 2000)

การหาระยะเวลาในการหุงต้มที่เหมาะสม (Cooking time)

ตัวอย่างเส้นบะหมี่ 25 กรัม ลงต้มในน้ำเดือด (น้ำกลั่น) 300 มิลลิลิตร เริ่มจับเวลาตั้งแต่นำเส้นบะหมี่ลงต้ม ทำการต้มจนกระทั่งใจกลางเส้นสีขาวหายไป โดยใช้กระจกนาฬิกาสองแผ่นบีบเส้นบะหมี่ หยุดเวลาเป็นเวลาในการหุงต้มที่เหมาะสม

การหาร้อยละของการดูดน้ำของบะหมี่ (Cooking yield)

นำเส้นบะหมี่ที่ต้มสุกแล้วนำขึ้นมาสะเด็ดน้ำและล้างด้วยน้ำประมาณ 50 มิลลิลิตร เมื่อสะเด็ดน้ำบนตะแกรงเป็นเวลา 1 นาที แล้วนำเส้นบะหมี่ไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละของการดูดน้ำ

การหาร้อยละของการสูญเสียของแข็งระหว่างการหุงต้ม (Cooking loss)

รวบรวมน้ำต้มเส้นบะหมี่และน้ำล้างบะหมี่เทใส่บีกเกอร์ จากนั้นนำไประเหยแห้งใส่ตู้ทำแห้งลมร้อนจนกระทั่งน้ำหนักคงที่จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละของการสูญเสียของแข็งระหว่างการต้ม

สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่

ลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่ที่ผ่านการหุงต้มโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) โดยใช้หัววัด Spaghetti tensile grips (A/SPR) เพื่อวัดค่าแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) และระยะทางก่อนการดึงขาด(distance) และใช้หัววัด light knife blade (A/LKB-F) เพื่อวัดค่าความแน่นเนื้อ (firmness) โดยดัดแปลงจากชุลีกร (2549)

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติจากแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Random Design; CRD) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ลักษณะปรากฏของเส้นบะหมี่

บะหมี่จากแป้งสาลีและจากแป้งข้าว พบว่าก่อนการหุงต้มเส้นบะหมี่มีสีเหลืองเข้มมากกว่าเส้นบะหมี่หลังการหุงต้มและบะหมี่ทั้งสองชนิดมีลักษณะเส้นที่ดึงยืดได้ (Figure 1)

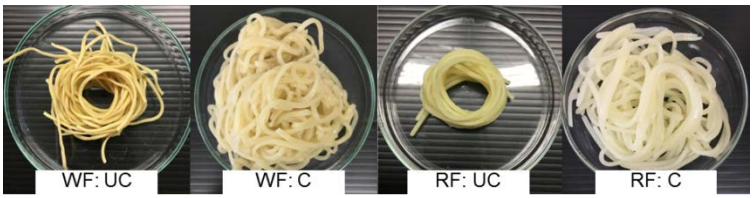


Figure 1 Uncooked (UC) and Cooked (C) Noodles made from wheat flour (WF) and rice flour (RF)

ลักษณะปรากฏของเส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่เติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว (PPI) ก่อนการหุงต้ม สีของเส้นบะหมี่ที่เติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วมีสีน้ำตาลเข้มกว่าเส้นบะหมี่หลังการหุงต้ม และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว เส้นบะหมี่มีสีน้ำตาลเข้มขึ้น หลังจากการหุงต้มพบว่าการเติม PPI ที่ความเข้มข้น 5 และ 10% เส้นบะหมี่มีลักษณะที่ยืดหยุ่น สามารถดึงยืดได้ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PPI 20% เส้นบะหมี่มีลักษณะที่แฉะและไม่สามารถดึงยืดได้ (Figure 2)

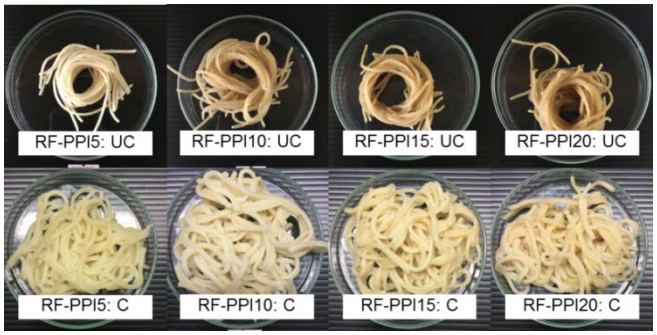


Figure 2 Uncooked (UC) and Cooked (C) Noodles made from rice flour mixed with pea protein isolate (PPI) at 5, 10, 15 and 20%

ลักษณะปรากฏของเส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่เติมโปรตีนไข่ขาวผง (EWP) ที่ความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20% พบว่าก่อนการหุงต้มเส้นบะหมี่ที่เติม EWP มีสีเหลืองเข้มกว่าเส้นบะหมี่หลังการหุงต้ม (Figure 3) เมื่อผ่านการหุงต้ม เส้นบะหมี่ที่เติม EWP 5% มีความยืดหยุ่น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้น พบว่าเส้นบะหมี่มีความยืดหยุ่นลดลง และเปราะมากขึ้น

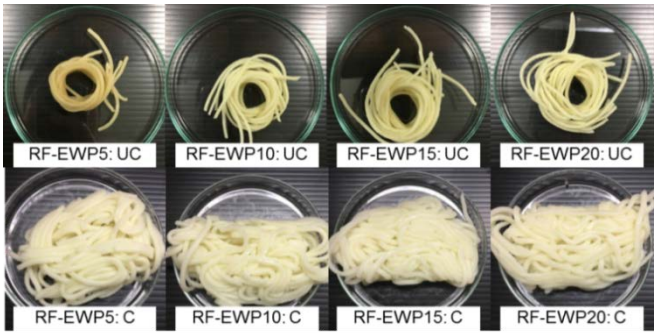


Figure 3 Uncooked (UC) and Cooked (C) Noodles made from rice flour mixed with egg white powder (EWP) at 5, 10, 15 and 20%

ค่าพีเอชและสีของเส้นบะหมี่

จากการศึกษาผลของการเติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วและไข่ขาวผง พบว่าค่าพีเอชของบะหมี่ทุกตัวอย่างมีค่าพีเอชประมาณ 9.66 – 9.88 (Table 1) เนื่องจากในสูตรการผลิตบะหมี่มีการใช้โซเดียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นเกลือเบสในส่วนผสมจึงส่งผลทำให้บะหมี่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงด่าง (pH 9) นอกจากนี้การเติมโซเดียมคาร์บอเนตมีผลทำให้เส้นบะหมี่มีสีเหลือง เนื่องจากสารฟลาโวนที่อยู่ในแป้งเมื่ออยู่ในสภาวะเป็นเบสจะให้สีเหลือง

(Fortmann and Joiner, 1971) อีกทั้งยังช่วยทำให้เกิดกลิ่นรสของบะหมี่และยังทำให้เส้นบะหมี่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ดี (Miskelly, 1998)

จาก Figure1 และ Table1 พบว่าสีของเส้นบะหมี่จากแป้งข้าว มีค่าความสว่างลดลงและมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสีของเส้นบะหมี่จากแป้งสาลี อาจเนื่องมาจากสารฟลาโวนที่มีในแป้งสาลีมากกว่าแป้งข้าว นอกจากนี้เมื่อเติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว (PPI) และไข่ขาวผง (EWP) พบว่าเส้นบะหมี่จากแป้งข้าวมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และค่าความเป็นแดง (a^*) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) โดยพบว่าเส้นบะหมี่ที่เติม EWP ให้ค่าความสว่าง (L^*) มากขึ้น เนื่องจากไข่ขาวผงที่ใช้มีสีเหลืองนวลจึงช่วยเสริมให้บะหมี่จากแป้งข้าวที่เติมไข่ขาวผงมีสีที่สว่างขึ้น ค่าความสว่าง (L^*) ของเส้นบะหมี่ที่เติม PPI มีค่าความสว่าง (L^*) ที่ลดลงนั้นอาจเป็นเพราะโปรตีนไอโซเลตจากถั่วมีสีน้ำตาลจึงทำให้เส้นบะหมี่ที่ได้มีค่าความสว่าง (L^*) ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ PPI

Table 1 Color and pH parameters of Alkaline noodles

Sample	pH	Color parameter		
		L^*	a^*	b^*
WF	9.87 ± 0.04 ^{a}	72.73 ± 1.01 ^{e}	0.84 ± 0.09 ^{a}	23.42 ± 0.98 ^{a}
RF	9.71 ± 0.09 ^{b}	79.48 ± 0.82 ^{c}	-3.67 ± 0.10 ^{b}	20.00 ± 0.68 ^{bcd}
RF - PPI 5	9.88 ± 0.03 ^{a}	76.32 ± 1.80 ^{d}	-0.87 ± 0.06 ^{e}	20.30 ± 0.72 ^{bc}
RF - PPI 10	9.81 ± 0.01 ^{ab}	71.55 ± 0.77 ^{f}	0.73 ± 0.07 ^{d}	20.54 ± 1.32 ^{b}
RF - PPI 15	9.73 ± 0.06 ^{ab}	69.11 ± 0.64 ^{g}	1.04 ± 0.08 ^{b}	19.52 ± 0.46 ^{de}
RF - PPI 20	9.67 ± 0.01 ^{b}	68.06 ± 0.66 ^{h}	1.72 ± 0.14 ^{a}	19.56 ± 0.67 ^{de}
RF - EWP5	9.68 ± 0.05 ^{b}	80.97 ± 0.91 ^{b}	-3.74 ± 0.05 ^{f}	19.64 ± 0.75 ^{cde}
RF - EWP10	9.68 ± 0.12 ^{b}	82.24 ± 1.12 ^{a}	-4.20 ± 0.08 ^{h}	19.24 ± 0.69 ^{e}
RF - EWP15	9.66 ± 0.14 ^{b}	81.57 ± 0.30 ^{ab}	-4.18 ± 0.13 ^{gh}	19.04 ± 0.36 ^{e}
RF - EWP20	9.69 ±0.09 ^{b}	81.54 ± 0.49 ^{ab}	-4.11 ± 0.10 ^{g}	19.33 ± 0.41 ^{de}

Mean values with different superscripts within the same column are significantly different ($p\leq0.05$)

สมบัติด้านการหุงต้มของผลิตภัณฑ์บะหมี่จากแป้งข้าวที่เติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วและไข่ขาวผง

Martin *et al.* (2014) ได้ศึกษาคุณภาพของเส้นพาสต้าปราศจากกลูเตน พบว่าโพลิเมอร์ของสตาร์ชสามารถจับกันเป็นโครงข่ายแต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่ากลูเตน จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการหุงต้ม (Cooking loss)สูงและมีความแน่นเนื้อต่ำ (Marti *et al.,* 2014) ดังนั้นในการทดลองจึงศึกษาสมบัติด้านการหุงต้มของเส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่เติมโปรตีนต่างชนิดกัน จากผลการทดลองพบว่า บะหมี่จากแป้งข้าว (RF) และบะหมี่เติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว (PPI) หรือไข่ขาวผง (EWP) ใช้ระยะเวลาในการหุงต้มมากกว่าบะหมี่จากแป้งสาลี (WF) และ พบว่าบะหมี่ที่เติม PPI 15 และ 20% มีปริมาณCooking loss มากที่สุด (Table 2) รองลงมาคือบะหมี่เติม PPI 5 และ 10 % อย่างไรก็ตามเส้นบะหมี่ที่เติม EWP ทุกระดับมีปริมาณ Cooking loss ไม่แตกต่างจากบะหมี่ RF และ WF ($p> 0.05$) ซึ่งปริมาณ Cooking loss สามารถบอกคุณภาพในการหุงต้มของบะหมี่ได้ หากมีค่า Cooking loss สูงแสดงว่าเส้นไม่มีความคงทนต่อการหุงต้มเนื่องจาก มีสตาร์ชที่

ละลายออกมาในน้ำต้มได้ในปริมาณมาก (ชุลีกร, 2549) นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นบะหมี่ที่เติม EWP 20% มีร้อยละ การดูดน้ำกลับ (cooking yield) มากที่สุด เนื่องจากการเติมไข่ขาวจะทำให้โครงสร้างตาข่ายโปรตีนมีความแข็งแรงจึงช่วยห่อหุ้มเม็ดสตาร์ชและกักเก็บโมเลกุลของน้ำไว้ในโครงสร้างของเส้นบะหมี่ (พิลัยพร, 2555) จึงทำให้บะหมี่ที่เติม EWP มีปริมาณ cooking yield เพิ่มขึ้น และมีปริมาณ cooking loss ลดลง สำหรับเส้นบะหมี่ที่เติม PPI 10, 15 และ 20% มีค่า cooking yield น้อยที่สุดไม่แตกต่างจากเส้นบะหมี่ที่เติม EWP 20% เนื่องจากการเติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วในปริมาณมากเกินไปโปรตีนอาจจับกลุ่มกันเองแล้วแยกเฟสที่เป็นสตาร์ชออกมาจึงทำให้สตาร์ชชะละลายออกมาในระหว่างการหุงต้ม

Table 2 Cooking quality of alkaline noodles

Sample	Cooking quality		
	Cooking time (min)	Cooking loss (%)	Cooking yield (%)
WF	4.45 ± 0.00	8.78 ± 0.27 ^{c}	183.93 ± 8.04 ^{ab}
RF	6.30 ± 0.00	9.13 ± 0.96 ^{c}	155.42 ± 7.39 ^{cd}
RF - PPI 5	5.30 ± 0.00	11.10 ± 0.01 ^{b}	127.07 ± 0.56 ^{e}
RF - PPI 10	5.00 ± 0.00	10.75 ± 0.19 ^{b}	141.18 ± 2.66 ^{de}
RF - PPI 15	5.45 ± 0.00	13.30 ± 0.60 ^{a}	141.46 ± 3.58 ^{de}
RF - PPI 20	5.45 ± 0.00	13.55 ± 0.42 ^{a}	144.33 ± 9.41 ^{de}
RF - EWP5	5.30 ± 0.00	8.66 ± 0.10 ^{c}	146.27 ± 1.37 ^{de}
RF - EWP10	8.00 ± 0.00	9.59 ± 0.76 ^{c}	169.24 ± 9.29 ^{bc}
RF - EWP15	8.30 ± 0.00	8.81 ±0.61 ^{c}	184.50 ± 9.57 ^{ab}
RF - EWP20	8.30 ± 0.00	8.48 ± 0.18 ^{c}	194.02 ± 15.83 ^{a}

Mean values with different superscripts within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$)

สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่จากแป้งข้าวที่เติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วและไข่ขาวผง

จากการทดลองพบว่า บะหมี่ที่เติม PPI 10% มีค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) สูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ในขณะที่บะหมี่ที่เติม PPI 5% มีค่าความแน่นเนื้อรองลงมา และพบว่าเส้นบะหมี่จากแป้งข้าวมีค่าความแน่นเนื้อน้อยที่สุด ($p \leq 0.05$) โดย พิลัยพร (2555) กล่าวว่าการเติมไข่ขาวในเส้นบะหมี่ปราศจากกลูเตนจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อสัมผัส และลดปริมาณ Cooking loss โปรตีนไข่ขาวจะช่วยเสริมคุณภาพด้านการหุงต้ม ช่วยรักษาความแน่นเนื้อ (firmness) และความแข็งแรง (strength) ของโครงสร้างบะหมี่ เนื่องจากโปรตีนอัลบูมิน มีความสามารถในการเชื่อมต่อกับสตาร์ชแกรนูล เมื่อตรวจสอบค่าแรงดึง (Tensile Strength) พบว่าบะหมี่ที่เติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วสามารถวัดค่าแรงดึงได้ แต่เมื่อเติม PPI 20% ในเส้นบะหมี่พบว่าเส้นขาดง่าย ในขณะที่เส้นบะหมี่ที่เติม EWP สามารถวัดค่าแรงดึงได้เมื่อเติมไข่ขาวผง 5% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไข่ขาวมากขึ้น เส้นบะหมี่ขาดง่ายและไม่สามารถวัดค่าได้ ในเส้นบะหมี่นั้นประกอบด้วยเมทริกซ์ที่ประกอบไปด้วยสตาร์ชและโปรตีน ซึ่งสมบัติของเมทริกซ์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ อุณหภูมิในการเกิดเจลของเฟสต่อเนื่อง ปริมาณ fraction ของเฟสต่อเนื่องและความคงทนของ filler ในเฟสต่อเนื่อง (Detchewa *et al.*, 2016) จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมปริมาณโปรตีนไอโซเลตจากถั่วหรือไข่ขาวผงที่มากขึ้นทำให้ไม่สามารถวัดค่าแรงดึงได้เนื่องจากการที่มีโปรตีนปริมาณมากใน

ระบบของเส้นบะหมี่ โปรตีนอาจจะจับกลุ่มกันเองแล้วแยกเฟสออกจากสตาร์ชจึงทำให้โครงสร้างของเส้นบะหมี่อ่อนแอส่งผลทำให้เส้นที่ได้ไม่มีความแข็งแรงมากพอที่จะวัดได้ค่าแรงดึงได้ การผลิตบะหมี่จากแป้งข้าว ให้เนื้อสัมผัสที่มีการดึงยืดของเส้นและความเหนียวน้อยกว่าบะหมี่จากแป้งสาลี ดังนั้นการเติม PPI 5-10 % สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของการทำบะหมี่จากแป้งข้าว เนื่องจากโปรตีนไอโซเลตจากถั่วสามารถช่วยเป็นโครงสร้างตาข่ายส่งผลให้เส้นมีความยืดหยุ่นและมีแข็งแรงขึ้น การเติมโปรตีนจากไข่ขาว สามารถเติมได้ 5% ในบะหมี่จากแป้งข้าว และส่งผลให้เส้นมีความแข็งแรงสูงขึ้น แต่เมื่อเติม EWP ในปริมาณที่สูง อาจทำให้โปรตีนเกิดการจับกลุ่มกันเอง และเกิดการแยกเฟสส่งผลทำให้เส้นมีความยืดหยุ่นต่ำลงแต่มีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น

Table 3 Textural properties of alkaline noodles

Sample	Texture		
	Firmness (N)	Tensile Strength (N)	Distance (cm)
WF	1.02 ± 0.04 ^{de}	0.09 ± 0.01 ^{ab}	2.72 ± 0.75 ^{a}
RF	0.82 ± 0.13 ^{e}	0.09 ± 0.02 ^{ab}	1.66 ± 0.33 ^{bc}
RF - PPI 5	1.58 ± 0.28 ^{b}	0.09 ±0.02 ^{ab}	1.85 ± 0.52 ^{b}
RF - PPI 10	2.08 ± 0.91 ^{a}	0.11 ± 0.04 ^{a}	1.76 ± 0.48 ^{bc}
RF - PPI 15	1.39 ± 0.36 ^{bc}	0.07 ± 0.02 ^{b}	1.18 ± 0.48 ^{c}
RF - PPI 20	1.51 ± 0.21 ^{bc}	Not determined	Not determined
RF - EWP5	1.21 ± 0.28 ^{cd}	0.09 ± 0.02 ^{ab}	1.42 ± 0.59 ^{bc}
RF - EWP10	1.05 ± 0.20 ^{de}	Not determined	Not determined
RF - EWP15	1.23 ± 0.18 ^{bcd}	Not determined	Not determined
RF - EWP20	1.49 ± 0.19 ^{bc}	Not determined	Not determined

Mean values with different superscripts within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

สรุป

การเติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว หรือไข่ขาวผง ในผลิตภัณฑ์บะหมี่จากแป้งข้าวพบว่า ค่า พีเอชของเส้นบะหมี่ที่เติม โปรตีนไอโซเลตจากถั่ว และไข่ขาวผง มีค่า 9.66 – 9.88 โดยเส้นบะหมี่ที่มีปริมาณโปรตีนไอโซเลตจากถั่วเพิ่มขึ้นจะมีค่าความสว่างลดลง ในขณะที่เส้นบะหมี่ที่เติมไข่ขาวผง เพิ่มขึ้นมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านการหุงต้มพบว่า เส้นบะหมี่ที่เติมไข่ขาวผงมี Cooking loss ต่ำเช่นเดียวกับเส้นบะหมี่จากแป้งข้าว และ แป้งสาลี เส้นบะหมี่ที่เติมไข่ขาวผง 15 และ 20% มีค่า cooking yield ใกล้เคียงกับเส้นบะหมี่จากแป้งสาลี สำหรับสมบัติด้านเนื้อสัมผัสพบว่า เส้นบะหมี่ที่เติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว 10 % มีค่าความแน่นเนื้อมากที่สุดและเส้นบะหมี่ที่เติมไข่ขาวผง10 % มีความแน่นเนื้อใกล้เคียงกับบะหมี่ WF และเส้นบะหมี่ที่เติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วหรือ ไข่ขาวผง 5% มีค่าแรงดึงใกล้เคียงกับเส้นบะหมี่จากแป้งข้าว และแป้งสาลี

เอกสารอ้างอิง

ชุลีกร วัชรารัตน์. 2549. **ผลิตภัณฑ์บะหมี่จากแป้งข้าวพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็ง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิลัยพร ดื่มโชค. 2555. **การใช้แป้งข้าวฟ่างทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์บะหมี่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรพรรณ กัลปนายุทธ. 2547. **การปรับปรุงคุณภาพเส้นก๋วยเตี๋ยวพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิทผ่านกระบวนการพาสเจอไรเซชัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

A.A.C.C. 2000. **Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists**. 10th ed. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.

Detchewa, P., M. Thongngam and O. Naivikul. 2012. Physicochemical and thermal properties of non-waxy rice flour as affected by waxy rice flour and its influence on textural and cooking properties of rice spaghetti **International Conference on Nutrition and Food Sciences** 39:235-239.

_____, _____, J.-L. Jane and O. Naivikul. 2016. Preparation of gluten-free rice spaghetti with soy protein isolate using twin-screw extrusion. **Journal of Food Science and Technology** 53(9):3485-3494.

Fortmann, K.L. and R.R. Joiner. 1971. Wheat pigment and flour color, pp. 493-522. *In* Y. Pomeranz, ed. **Wheat Chemistry and Technology**. AACC., St. Paul, MN.

Hsu, C.L., W. Chen, Y.M. Weng and C.Y. Tseng. 2003. Chemical composition, physical properties, and antioxidant activities of yam flours as affected by different drying methods. **Food Chemistry** 83: 85-92.

Kim, Y., J.I. Kee, S. Lee and S.H. Yoo. 2014. Quality improvement of rice noodle restructured with rice protein isolate and transglutaminase. **Food Chemistry** 145: 409-416.

Marti, A., A. Barbiroli, M. Marengo, L. Fongaro, S. Iametti and M.A. Pagani. 2014. Structuring and texturing gluten-free pasta: egg albumen or whey proteins?. **European Food Research and Technology** 238(2):217-224.

Miskelly, D.M. 1998. The use of alkali for noodle processing, Bread Research Institution of Australia, pp. 227-273. *In* J.E. Kruger, R.B. Matsuo and J.W. Dick, eds. **Pasta and Noodle Technology**. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota.

Shelke, K.L., J.W. Dick, Y.F. Holm and K.S. Loo. 1990. Chinese wet noodle formulation: a response surface methodology study. **Cereal Chemistry** 67(4): 338-342.

Yalcin, S. and A. Basman. 2008. Effects of gelatinisation level, gum and transglutaminase on the quality characteristics of rice noodle. **International Journal of Food Science & Technology** 43: 1637-1644.

ผลของระดับการขัดสีต่อสารให้กลิ่นในข้าวหุงสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

Effect of Degrees of Milling on Aroma Compounds in Cooked Rice (Khao Dawk Mali 105)

อิสราภรณ์ จินะโกฏิ[1] และ วรรณี จิรภาคย์กุล[1*]

Issaraporn Jinakot[1] and Wannee Jirapakkul[1*]

บทคัดย่อ

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (KDML105) เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของไทย เนื่องจากมีกลิ่นหอมเฉพาะตัวที่เป็นเอกลักษณ์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อผ่านการขัดสี กลิ่นหอมจะลดลงรวมทั้งยังทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติ (off-flavor) ดังนั้นในงานทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระดับการขัดสี (degrees of milling) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ข้าวกล้อง (0%รำ), ข้าวขัดสีระดับต่ำ (2-4%รำ) และข้าวขัดสีระดับสูง (11-13%รำ) ต่อชนิดและปริมาณของสารให้กลิ่นในข้าวขาวดอกมะลิ105หุงสุก ซึ่งทำการสกัดสารให้กลิ่นด้วย dichloromethane ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gas chromatography - time of flight /mass spectrophotometry (GC-TOFMS) พบว่า เมื่อนำข้าวขัดสีระดับต่างกันมาหุงสุก มีปริมาณสารให้กลิ่นกลุ่มไพโรลมากที่สุด ได้แก่ 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) เป็นสารที่มีลักษณะกลิ่นคล้ายใบเตย หรือข้าวโพดคั่ว โดยปริมาณความเข้มข้นของ 2AP ในข้าวกล้อง ข้าวขัดสีระดับต่ำ และข้าวขัดสีระดับสูง มีค่าเท่ากับ 666.2, 514.9 และ 303.0 นาโนกรัม/กรัมตามลำดับ โดยปริมาณความเข้มข้น 2AP ในข้าวขัดสีระดับสูงจะมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับข้าวกล้อง และยังพบสารให้กลิ่นกลุ่มอื่นๆซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อผ่านการขัดสีระดับสูงขึ้น จากการศึกษานี้ทำให้ทราบว่าระดับการขัดสีที่มากขึ้นมีผลต่อสารให้กลิ่นโดยรวมในข้าวขาวดอกมะลิ105หุงสุก

ABSTRACT

Khao Dawk Mali 105 (KDML105) is an economic crop in Thailand due to its unique aroma. Unfortunately, milling process can decrease aroma and cause off-flavor in rice. Hence, the objective of this study was to identify the aroma compounds in cooked rice as affected by different degrees of milling, i.e. brown rice (0% of rice bran), low- milled rice (2-4% of rice bran), and high-milled rice (11-13% of rice bran). The aroma compounds were extracted with dichloromethane and analyzed by gas chromatography - time of flight mass spectrophotometry (GC-TOFMS). One of the major volatile groups found was pyrroles, e.g. 2-acetyl-1-pyrroline (2AP), which provided popcorn- or pandan-like aroma to the rice. Relative concentrations of 2AP in brown rice, low-milled rice and high-milled rice were 660.2, 514.9 and 303.0 ng/g, respectively, with high-milled rice had significantly lower 2AP than brown rice ($p \leq 0.05$). Other volatile groups were also found to decrease as the milling degree increased. This study has shown that the high degree of milling affects aroma profile of cooked KDML105 rice.

Key Words: KDML105, cooked rice, degrees of milling, 2AP, popcorn-like aroma, green-like aroma

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

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Argo-Industry, Kasetsart University, Bang Khen, Bangkok 10900

คำนำ

ข้าวเป็นพืชอาหารหลักสำคัญ โดยเฉพาะประเทศไทย และแถบประเทศเอเชีย นอกจากนี้ข้าวยังเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของไทย โดยไทยเป็นอันดับต้นๆที่ส่งออกในตลาดโลก ข้าวที่เป็นที่นิยมในการบริโภค และส่งออกมากที่สุด คือ ข้าวหอมะลิไทย ได้แก่ พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (KDML 105) ในระหว่างปี พ.ศ. 2555 – 2558 ประเทศไทยสามารถส่งออกข้าวหอมมะลิ 1.8 -1.9 ล้านตัน หรือคิดเป็น ร้อยละ 21-22 ของปริมาณข้าวส่งออกรวม (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2559)

ข้าวหอมมะลิเป็นข้าวพันธุ์หอมที่มีลักษณะเมล็ดเรียวยาว ซึ่งมีคุณภาพแตกต่างจากข้าวทั่วไป โดยเฉพาะคุณภาทางด้านกลิ่นหอม เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่ให้กลิ่นหอมได้ทั้งก่อน และหลังนำไปหุงสุก หรือให้ความร้อน ซึ่งในงานวิจัยของ Mahattanatawee และ Rouseff (2014) ได้ทำการศึกษาสารให้กลิ่นในข้าวพันธุ์หอม 3 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 Basmati และ Jasmati พบว่า กลิ่นข้าวหุงสุก เกิดจาก สาร 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) เป็นสารให้กลิ่นสำคัญ ทั้ง 3 สายพันธุ์ แต่อย่างไรก็ตามความหอมของข้าวจะลดลงเรื่อยๆ โดยเฉพาะหลังการเก็บเกี่ยว หรือเมื่อผ่านการแปรรูปข้าวเปลือก เช่น การขัดสี หรือขัดขาวเพื่อให้ได้ข้าวสารตามที่ผู้บริโภคต้องการ เนื่องจาก สารให้ความหอมในข้าวเป็นสารที่ระเหยได้ มีความไวต่ออุณหภูมิ และแสง (ขวัญหทัย, 2548) ในงานวิจัยของ Tsugita *et al.* (1980) ได้ศึกษาสารให้กลิ่นในข้าวหอมญี่ปุ่น พันธุ์ Koshihikari ที่มีลักษณะเมล็ดสั้น เมื่อนำไปหุงสุกหลังการขัดสีที่ระดับแตกต่างกัน พบว่า ผลของระดับการขัดสีที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อกลิ่นของข้าวหอมแตกต่างกัน โดยสารให้กลิ่นหลักๆที่พบ ได้แก่ hexanal ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นที่เป็นองค์ประกอบที่พบมากในข้าวทุกพันธุ์, 2-pentylfuran, 1-hexanol, 2-heptanone และ m-xylene รวมทั้งสารประกอบอื่นๆที่ให้กลิ่นจะระเหยได้ง่ายขึ้น เมื่อผ่านการให้ความร้อน หรือหุงสุก (Widjaja *et al*., 1996) นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Yajima *et al*. (1978) ยังได้วิเคราะห์หาสารให้กลิ่นในข้าวญี่ปุ่นหุงสุกเช่นกัน โดยพบว่าสารให้กลิ่นส่วนใหญ่เป็นสารกลุ่มไฮโดรคาร์บอน อัลดีไฮด์ กรด เอสเทอร์ ฟีนอล ไพริดีน และไพราซีน

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของระดับการขัดสี ที่มีต่อชนิด และปริมาณสารให้กลิ่นของข้าวหอมมะลิหุงสุก เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับข้าวหอมมะลิไทย ทั้งในรูปข้าวกล้อง และข้าวสารที่มีระดับการขัดสีต่างกันในท้องตลาด รวมทั้งเพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาขั้นตอนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าวหอมเพื่อเพิ่มโอกาสทางตลาดโลกและช่วยเพิ่มมูลค่าข้าวหอมของประเทศไทย

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่าง

1.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวขัดสีระดับต่าง ๆ

สุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวช่วงต้นของฤดูกาล โดยมีความชื้นในช่วง 14-16% ทำการแยกสิ่งเจือปนออก จากนั้นกะเทาะข้าวเปลือก ด้วยเครื่องลูกยาง (rubber roll) เพื่อให้ได้ข้าวกล้อง (0%รำ) ทำการคัดแยกข้าวกล้องเต็มเมล็ด นำไปขัดสีด้วยเครื่องตะแกรงขัดขาว และทำการเก็บรำที่ได้จากการขัดสีในแต่ละระดับ เพื่อจำแนกระดับการขัดสีของข้าว โดยแบ่งเป็น 2 ระดับ ได้แก่ ขัดสีระดับต่ำ (2-4%รำ) และระดับสูง (11-13%รำ) (FAO, 1992; อรอนงค์, 2547)

1.2 การเตรียมตัวอย่างข้าวหุงสุก

นำข้าวที่ได้จากข้อ 1.1 ปริมาณ 50 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นที่ปราศจากกลิ่น (น้ำกลั่นที่ผ่านการให้ความร้อน และระเหยจนเหลือ 2 ใน 3 ของปริมาตรเริ่มต้น) ปริมาตร 75 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของข้าว: น้ำ เท่ากับ 1:1.5) และหุงเป็นเวลา 40 นาที

2. การศึกษาสารให้กลิ่นในข้าวหุงสุกที่ผ่านการขัดสีระดับต่างกัน

2.1 การวิเคราะห์ความชื้นในข้าวหุงสุก

ทำการวิเคราะห์ความชื้นในข้าวหุงสุกที่ได้จากข้อ 1.2 อ้างอิงจาก AOAC (2000)

2.2 การสกัดสารให้กลิ่นในตัวอย่างข้าวหุงสุก

นำตัวอย่างข้าวหุงสุก ที่ได้จากข้อ 1.2 ปริมาณ 50 กรัม จุ่มลงไนโตรเจนเหลว ก่อนนำไปบดโดยใช้เครื่องบดผสม เติม internal standard (2-methyl-3-hepatnone) ความเข้มข้น 1.18 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ปริมาตร 25 ไมโครลิตร และสกัดด้วยตัวทำละลาย dichloromethane 150 มิลลิลิตร โดยนำไปสกัดบนเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดูดส่วนสารละลายเก็บไว้ ทำการสกัดซ้ำ อีก 2 ครั้ง ระเหยสารสกัดที่สกัดได้ ด้วย vigreux ที่อุณหภูมิ 47 องศาเซลเซียส จนเหลือปริมาตรรวม 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกำจัดไขมันและสารประกอบที่ไม่ระเหย ด้วยวิธีกลั่นภายใต้ระบบสุญญากาศ และทำให้เข้มข้นด้วย vigreux อีกครั้ง ก่อนกรองผ่านใยแก้ว และ anhydrous sodium sulphate จากนั้นทำให้ตัวอย่างเข้มข้นอีกครั้งด้วย vigreux และเป่าระเหยด้วยแก๊สไนโตรเจน ตามลำดับ จนได้ปริมาตรสุดท้าย 200 ไมโครลิตร และนำไปเก็บในขวดทึบแสง ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส

2.3 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารให้กลิ่นในข้าวหุงสุก

นำสารสกัดที่ได้จากข้อ 2.2 ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ด้วยเครื่อง gas chromatography - time of flight/mass spectrophotometer (GC-TOFMS) ฉีดสารตัวอย่างแบบ cool on column โดยอุณหภูมิของ intet เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ใช้แก๊สฮีเลียม เป็น carrier gas ที่อัตราการไหลคงที่ที่ 1 มิลลิลิตร/นาที แยกสารด้วยแคปิลารีคอลัมน์ ชนิด Stabilwax ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ชั้นเคลือบหนา 0.25 ไมโครเมตร โดยตั้งอุณหภูมิ oven เริ่มต้นที่ 35 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียส/นาที จนอุณหภูมิถึง 225 องศาเซลเซียส จากนั้นคำนวณค่า retention index (RI) จากสารมาตรฐาน n-alkane และทำการเปรียบเทียบค่า RI ที่ได้กับฐานข้อมูลอื่นที่ใช้คอลัมน์ชนิดเดียวกัน เพื่อระบุสารให้กลิ่นแต่ละชนิด และคำนวณหาปริมาณสาร โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้พีคของสารให้กลิ่นแต่ละชนิดกับพื้นที่ใต้พีคของสาร internal standard ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน และรายงานเป็นความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารให้กลิ่นชนิดนั้นๆต่อน้ำหนักฐานแห้งของตัวอย่าง (นาโนกรัมต่อกรัม; ppb)

3. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ข้อมูลโดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับนัยสาคัญ $p \leq 0.05$ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Dancan' s multiple range test

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของระดับการขัดสีที่แตกต่างกัน ต่อชนิดและปริมาณสารให้กลิ่นในข้าวหุงสุก

ในการวิเคราะห์หาสารให้กลิ่นในข้าวหุงสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการขัดสีระดับต่างกัน ได้แก่ ข้าวกล้อง (0%รำ), ข้าวขัดสีระดับต่ำ (2-4%รำ), และข้าวขัดสีระดับสูง (11-13%รำ) พบว่า ในข้าวกล้อง และข้าวที่ผ่านการขัดสี ทั้ง 2 ระดับ มีปริมาณสารให้กลิ่นส่วนใหญ่เป็นสารกลุ่มไพโรล แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ กรด ฟูแรน แลคโตน ไทอะโซล ฟีนอล เอมีน และไฮโดรคาร์บอน ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 1

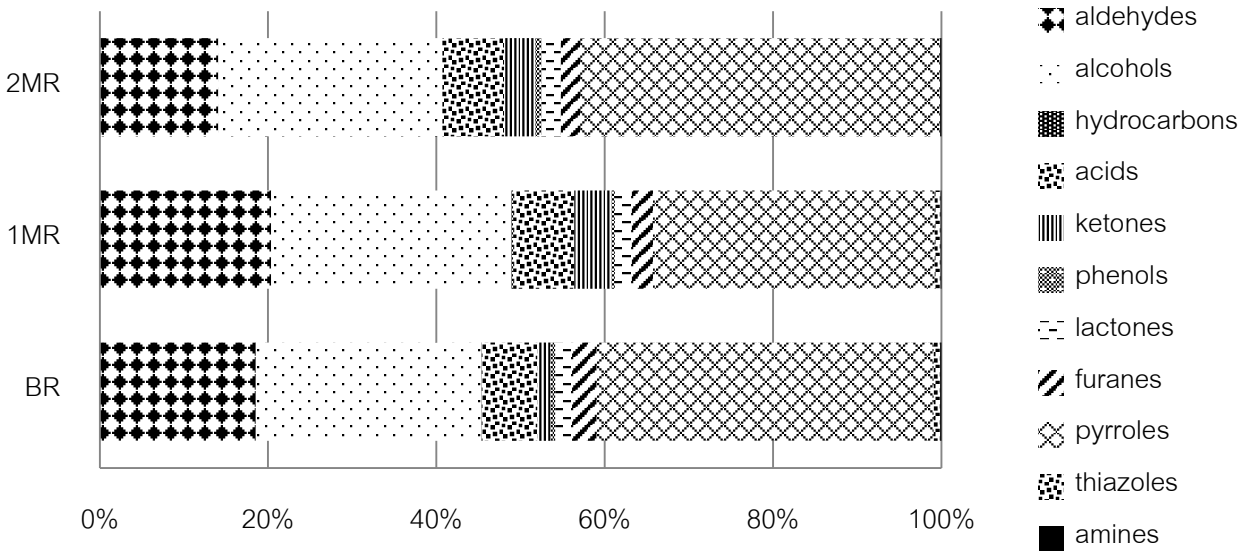


Figure 1 Comparison of relative concentration percentage of various groups of aroma compounds in different degrees of milling in cooked rice. (BR= brown rice (0% of rice bran) , 1MR= 2-4% of rice bran, 2MR= 11-13% of rice bran)

โดยพบว่าปริมาณสารให้กลิ่นกลุ่มไพโรลที่มีมากที่สุดในข้าวกล้อง และข้าวขัดสีทั้ง 2 ระดับ คือ 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) มีลักษณะกลิ่นคล้ายใบเตย หรือข้าวโพดคั่ว ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นสำคัญในข้าวพันธุ์หอม (Buttery *et al*., 1982) และมีปริมาณความเข้มข้นของ 2AP ในข้าวกล้อง, ข้าวขัดสีระดับต่ำ และข้าวขัดสีระดับสูง เท่ากับ 666.2, 514.9 และ303.0 นาโนกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยปริมาณความเข้มข้นของ 2APในข้าวขัดสีระดับสูงมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับข้าวกล้อง ดังแสดงใน Table 1 เนื่องมาจาก ปริมาณ 2AP จะพบในส่วนของรำข้าว (Yoshihashi *et al*., 2005) เมื่อทำการขัดสีปริมาณรำจะถูกแยกออกมา ดังนั้นข้าวกล้อง และข้าวที่ผ่านการขัดสีระดับต่ำ จะมีปริมาณ 2AP มากกว่าข้าวที่ผ่านการขัดสีระดับสูง นอกจาก 2AP จะพบได้ตามธรรมชาติของข้าวแล้ว Buttery *et al.,* (1983) ได้รายงานว่าการเกิด 2AP

นั้น สามารถเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด โดยปฏิกิริยาระหว่าง proline กับ 2-oxopropanal ซึ่งเป็นสารประกอบ dicarbonyl ที่ได้จากการสลายตัวของน้ำตาลเนื่องจากความร้อนจากการหุงสุกด้วยไอน้ำ นอกจากนี้ยังพบปริมาณสารกลุ่มแอลกอฮอล์ และอัลดีไฮด์ รองลงมา โดยส่วนใหญ่เป็นสารให้กลิ่นเขียว หรือกลิ่นหืน ซึ่งเป็นกลิ่นที่ไม่เป็นที่ต้องการในข้าวหุงสุก (off-flavor) เช่น 1-hexanol และ hexanal โดยพบว่า hexanal ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบในข้าว มีปริมาณความเข้มข้นในข้าวกล้อง, ข้าวขัดสีระดับต่ำ และข้าวขัดสีระดับสูง เท่ากับ 250.9, 223.8 และ 102.6 นาโนกรัม/กรัม โดยปริมาณความเข้มข้นของ hexanal ในข้าวขัดสีระดับสูง จะมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับข้าว ดังแสดงใน Table 1 รวมทั้งยังพบว่าปริมาณสารแอลกอฮอล์ และอัลดีไฮด์ชนิดอื่นๆมีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องจาก สารกลุ่มนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมัน เช่น linoleic acid, oleic acid และ palmitic acid (Fernando *et al.,* 2003) ซึ่งพบมากในรำ หรือชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว เมื่อโครงสร้างของเนื้อเยื่อข้าวเกิดความเสียหาย เช่น เกิดการเสียดสีในระหว่างการกะเทาะเปลือก หรือผ่านการขัดสี จะมีผลทำให้เอนไซม์กลุ่มไลโพไลติกในข้าว เช่น เอนไซม์ไลเปสทำปฏิกิริยากับกรดไขมันในรำได้ดี (Galliard *et al.*,1983) ดังนั้น เมื่อมีการขัดสีมากขึ้น ปริมาณของกรดไขมันที่อยู่ในชั้นของรำจะลดลง ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันเพื่อเกิดสารกลุ่มแอลกอฮอล์ และอัลดีไฮด์ลดลงตาม

นอกจากนี้ยังพบสารกลุ่มกรดในข้าวหุงสุก โดยปริมาณสารให้กลิ่นในกลุ่มกรดที่มีมากที่สุด ทั้งในข้าวกล้อง และข้าวขัดสีทั้ง 2 ระดับ คือ hexanoic acid มีลักษณะกลิ่นคล้ายเหงื่อ หรือกลิ่นหืน มีปริมาณแนวโน้มที่ลดลง เมื่อผ่านการขัดสีที่ระดับสูงขึ้น โดยสารกลุ่มนี้เกิดจาก hexanal ที่เป็นสารตั้งต้น ในปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Lee *et al*., 2000) ดังนั้น เมื่อข้าวผ่านการขัดสีที่ระดับสูงขึ้น ปริมาณ hexanal จะลดลง ส่งผลให้ ปริมาณ hexanoic acid ลดลงตาม ส่วนสารกลุ่มคีโตนที่พบมากที่สุดในข้าวหุงสุก ทั้งในข้าวกล้อง และข้าวขัดสีทั้ง 2 ระดับ คือ camphor มีลักษณะกลิ่นคล้ายการบูร ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเบต้า-ออกซิเดชันของกรดไขมันระหว่างการให้ความร้อนในการหุงข้าวด้วยไอน้ำ (Yajima *et al.*,1978)

ส่วนสารกลุ่มฟูแรนที่พบในข้าวหุงสุก ทั้งในข้าวกล้อง และข้าวขัดสีทั้ง 2 ระดับ คือ 2-pentylfuran มีลักษณะกลิ่นคล้ายถั่ว, furfural มีลักษณะกลิ่นหวาน หรือดอกไม้ และ 2(5H)-furanone มีลักษณะกลิ่นหวาน หรือกลิ่นไหม้ โดยพบว่าสารให้กลิ่น ทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณความเข้มข้นลดลงเมื่อผ่านการขัดสีระดับสูงขึ้น ซึ่งสารกลุ่มนี้อาจเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด โดยน้ำตาลรีดิวซ์ และโปรตีนในข้าวได้รับความร้อนจากการหุงสุกด้วยไอน้ำ เกิดการรวมตัวกันของหมู่คาร์บอนิล และหมู่อะมิโนอิสระ ทำให้เกิดสารประกอบกลุ่มที่เป็น heterocyclic compounds (ศุภศิริ, 2550) นอกจากสารกลุ่มฟูแรนแล้ว ยังพบสารกลุ่มไทอะโซล ได้แก่ benzothiazole มีลักษณะกลิ่นคั่ว หรือกลิ่นย่าง และ สารกลุ่มเอมีน ได้แก่ indole มีลักษณะกลิ่นหวาน หรือกลิ่นดอกไม้ ซึ่งมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อผ่านการขัดสีที่ระดับสูงขึ้น เช่นเดียวกัน

สารกลุ่มฟีนอลที่พบในข้าวหุงสุก ทั้งในข้าวกล้อง และข้าวขัดสีทั้ง 2 ระดับ คือ 4-vinyl guaiacol มีลักษณะกลิ่นคล้ายควัน โดยอาจจะเกิดจากความร้อนขณะหุงสุกด้วยไอน้ำ ทำให้ *p*-coumaric acid และ ferulic acid ซึ่งพบได้ตามธรรมชาติในข้าวเกิดการสลายตัว (Maga, 1978; Yajima *et al*., 1978)

นอกจากนี้ยังพบสารกลุ่มแลกโทน ซึ่งได้แก่ δ-butyrolactone, δ-nonalactone และ pantolactone มีลักษณะกลิ่นคาราเมล, มะพร้าว และสายไหมตามลำดับ มีปริมาณแนวโน้มที่ลดลงเมื่อผ่านการขัดสีระดับสูงขึ้น แต่ไม่พบ δ-nonalactoneในข้าวที่ผ่านการขัดสีทั้งในระดับต่ำ และระดับสูง

Table 1 The realative concentration of aroma compounds with different degrees of milling in cooked rice(BR= cooked brown rice (0% of rice bran) , 1MR= 2-4% of rice bran, 2MR= 11-13% of rice bran)

no.	odorant	RI*	Odor Decription*	relative concentration (ng/g dry basis)		
				BR	1MR	2MR
1	1-hexanal	>1100	green	250.9[a]	223.8[a]	102.6[b]
2	2-pentylfuran	1235	green,beany	4.2	3.1	2.1
3	2-acetyl-1-pyrroline	1344	pandan,popcorn	666.2[a]	514.9[a]	303.0[b]
4	1-hexanol	1367	green,leafy	25.9	25.5	9.7
5	furfural	1479	sweet,floral	1.1	1.5	n.d.
6	camphor	1505	camphor,green,leafy	36.5	27.5	26.4
7	benzaldehyde	1530	almond,woody	10.9	14.8	4.2
8	δ-butyrolactone	1642	sweet,caramel	10.8	6.3	6.7
9	2-(5H)-furanone	1774	sweet,burn	42.9	34.0	17.4
10	hexanoic acid	1864	sweaty	88.0	85.1	30.9
11	benzothiazole	1966	rosty,rubber	13.7	10.7	n.d.
12	δ-nonalactone	2045	coconut,sweet	0.34	n.d.	n.d.
13	pantolactone	2063	cotton candy	22.6	24.2	13.1
14	4-vinylguaiacol	2225	smokey	4.8	3.6	4.7
15	indole	2471	sweet,floral	2.6	1.9	1.7

RI = retention index

n.d. = not detected

[a-b] : Values with different letters in row were significantly different ($P \leq 0.05$) in cooked rice

*Odour description from Flavour-Base'04 of Leffingwell (2004)

สรุป

ข้าวที่ผ่านการเก็บเกี่ยวต้นฤดูกาล เมื่อนำมาหุงสุก พบว่าข้าวหุงสุกที่ไม่ผ่านการขัดสี หรือข้าวที่ผ่านการขัดสีระดับต่ำ จะมีชนิด และปริมาณสารให้กลิ่นมากกว่า ข้าวหุงสุกที่ผ่านการขัดสีระดับสูง เนื่องจากสารตั้งต้นที่สำคัญ หรือสารให้กลิ่นสำคัญในข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีมากในส่วนของเนื้อเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว หรือรำ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นข้อมูลแนวทางในการพัฒนาขั้นตอนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าวหอมมะลิกล้องและข้าวสารหอมมะลิไทย ที่มีระดับการขัดสีต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561

เอกสารอ้างอิง

ขวัญหทัย แซ่ทอง. 2548. **ผลของการใช้ความร้อน และความดันสูงต่อคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และกลิ่นรสของข้าวขาวดอกมะลิ** 105 *(Oryza sativa*, L.)**สุก และผลการเก็บรักษาข้าวสารต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวสุก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ศุภศิริ ศิลาน้อย. 2550. **สารระเหยให้กลิ่นที่สำคัญในข้าวมัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยลัยเกษตรศาสตร์.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2559. ปริมาณส่งออกข้าวไทย. **ข่าวสมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย** 1 (6): 2-2.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. **ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 18th ed. Association of Official Analytical Chemists, USA.

Buttery, R. G. and L. C. Ling. 1982. 2-Acetyl-1-Pyrroline: An Important Aroma Component of Cooked Rice. **Chemistry and Industry**: 958-959.

_____, _____, J. G. Turnbaugh and B. O. Juliano. 1983. Cooked Rice Aroma and 2-Acetyl-1-Pyrroline. **Journal of Agriculture and food Chemistry** 37(4): 823-826.

FAO. 1992. Towards Integrated Commodity and Pest Management in Grain Storage. Available Source: http://www.fao.org/docrep/x5048e/5048e02.html, December 16, 2017.

Fernado, D., S. Pinson and C. Bergman. 2003. Genetic Diversity for Lipid Content and Fatty Acid Profile in Rice Bran. **Journal of the American Oil Chemist' Society** 80(5): 485-490.

Galliard, T. 1983. Enzymatic Degradation of Cereal Lipids, pp. 111-147. In P.J. Barnes. **Lipids in Cereal Technology**. Academic Press, New York.

Lee, K.G., Mitchell, A. and Shibamoto, T. 2000. Antioxidative Activities of Aroma Extracts Isolated from natural plants, **Biofactors**, 13, 173-178.

Leffingwell, C. J. 2004. GRAS & EC Flavor Chemicals Report. Flavor-Base Professional Software Version 2004. Serial Number: FLAVBASE2004; Copyright 1989–2004. Canton, GA, USA: **Leffingwell &Associates**.

Maga, J.A. 1978. Simple Phenol and Phenolic Compounds in Food Flavor.**Food Science Nutrition** 10(4): 323-372.

Mahattanatawee, K and Russell R. L.. 2014. Comparison of Aroma Active and Sulfur Volatiles in Three Fragment Rice Cultivars Using GC-Olfactometry and GC-PFPD. **Food Chemistry** 154: 1-6.

Tsugita, T. T. Kurata and H. Kato. 1980. Volatile Components after Cooking Rice Milled to Different Degrees. **Agricultural and Biological Chemistry** 44(4): 835-840.

Widjaja, R., J. D. Craske and M. Wootton. 1996. Comparative Studies on Volatile Components of Non Fragrant and Fragrant Rices. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 70(2): 151-161.

Wongpornchai, S., K. Dumri, S. Jongkaewwattan and B. Siri. 2004. Effects of Drying Methods and Storage Time on the Aroma and Milling Quality of Rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105. **Food Chemistry** 87(3): 407-414.

Yajima, I., T. Yanai and M. Nakamura, H. Sakakibara and T. Habu. 1978. Volatile Flavor Components of Cooked Rice. **Agricultural Biological Chemistry** 42(6) : 1229-1233.

Yoshihashi, T., N. T. T. V. Surojanametakul, P. Tungtrakul and W. Varanyanond. 2005. Effect of Storage Conditions on 2-Acetyl-1-Pyrroline Content in Aromatic Rice Variety, Khao Dawk Mali 105. **Journal of Food Science** 70(1): 34-37.

การปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยการใช้สตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรแอซีเทต

Improvement of Thermoplastic Starch Films Blowing Ability Using Cassava Starch Acetate

ชาลิสา อินทะรังสี[1] และ น้ำฝน ลำดับวงศ์[2*]

Chalisa Indaransi[1] and Namfone Lumdubwong[2*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงการผลิตฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชให้ได้ฟิล์มชั้นเดียวและลดความไวต่อความชื้น โดยใช้การผสมสตาร์ชมันสำปะหลังแอซีเทตระดับ DS 0.09 กับสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติ ผลิตเป็นเทอร์โมพลาสติกเรซิน โดยใช้กระบวนการอัดรีดแบบสกรูคู่ และเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ผลการศึกษาพบว่าเทอร์โมพลาสติกเรซินจากสตาร์ชมันสำปะหลังแอซีเตทผสมกับสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติในอัตราส่วน 70:30 มีค่าดรรชนีการหลอมไหลและอุณหภูมิการเสื่อมสลายต่ำกว่าเรซินจากสตาร์ชธรรมชาติ และสามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชชั้นเดียวได้เป็นผลสำเร็จ โดยฟิล์มที่มีส่วนผสมของสตาร์ชดัดแปรมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นโดยค่าร้อยละการยืดตัวเพิ่มขึ้นจาก 142.74 เป็น 163.04 % และ ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นจาก 3.4 เป็น 6.4 MPa และสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำลดลงจาก1.97×10^3 g.mil /day.m^2.atm เป็น 1.57×10^3 g.mil /day.m^2.atm แต่มีประสิทธิภาพการยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านเพิ่มขึ้นจาก 302 cc.mil/m^2.day.atm เป็น 583 cc.mil/m^2.day.atm

ABSTRACT

This research is focused on the production of single-layer thermoplastic starch (TPS) blown films of native cassava starch / cassava starch acetate (DS 0.09) blends and moisture sensitivity of the films. TPS resin and film were produced using twin-screw extruder and blown-film extruder respectively. Melt flow index (MFI) of starch blends were decreased, compared to those of native starch. The single-layer TPS films acetate/native starch blends at 70:30 w/w were successfully prepared. Mechanical properties of the starch blend films were superior to those of the native blown films. The percentage of elongation and Young's modulus were significantly increased from 142.47 % to 163.04 % and from 3.4 to 6.4 MPa respectively. Further, water vapor permeability of the blends film was reduced from $1.97x10^3$ to $1.57\ x10^3$ g.mil/day.m^3.atm. In contrast, oxygen permeability of the films was increased from 302 to 583 cc.mil/m2.day.atm.

Key Words: bio based packaging, cassava starch, starch acetate, thermoplastic starch blown films

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

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นวัสดุพลาสติกชีวฐานที่ใช้สตาร์ชเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้การนำสตาร์ชมาขึ้นรูปให้เป็นฟิล์มพลาสติก สามารถกระทำได้ 2 กระบวนการคือ การผลิตฟิล์มแบบระบบน้ำมากเกินพอ ซึ่งเป็นระบบที่มีการให้ความร้อนกับสารแขวนลอยสตาร์ชที่มีความเข้มข้นประมาณ 5% โดยมีการกวนต่อเนื่อง ใช้แรงเฉือนต่ำ เมื่อสตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชันแล้ว จึงนำสารละลายสตาร์ชไประเหยน้ำออกจนได้เป็นฟิล์ม สำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบที่สอง เป็นการผลิตฟิล์มสตาร์ชด้วยกระบวนการอัดรีด (extrusion) ซึ่งเป็นระบบที่มีปริมาณน้ำน้อย ไม่เกิน 14%) โดยมีการเติมสตาร์ชและพลาสติไซเซอร์ลงในเครื่องอัดรีด (extruder) ที่มีแรงเฉือนและความดันสูง เมื่อผ่านกระบวนการดังกล่าว ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเทอร์โมพลาสติกเรซิน และนำไปเป่าขึ้นรูป (blown filming) ได้เป็นฟิล์ม ทั้งนี้กระบวนการเตรียมฟิล์มในรูปของการเป่าฟิล์ม เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้จริงในอุตสาหกรรม (Lim *et al.,* 2001)

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยใช้สตาร์ชจากวัตถุดิบที่ต่างกัน เช่น สตาร์ชข้าวโพด มันฝรั่ง ข้าว และมันสำปะหลัง ซึ่งสตาร์ชแต่ละชนิดมีรูปร่างเม็ดแกรนูล ปริมาณแอมิโลส ระดับและชนิดผลึกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการผลิตและขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและสมบัติเชิงหน้าที่ของฟิล์ม (Zullo and Lannace 2009) นอกจากนี้ก็ยังพบข้อด้อยของฟิล์มสตาร์ชธรรมชาติที่กล่าวมา คือมีความเปราะง่าย และไวต่อความชื้น (Shanks and Kong, 2012) ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่ใช้สตาร์ชดัดแปรทางเคมีมาผสมหรือใช้เป็นวัตถุดิบทั้งหมดสำหรับการผลิตฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช Thunwall *et al.* 2008 นำเทอร์โมพลาสติกเรซินเตรียมจากสตาร์ชมันฝรั่งธรรมชาติ และมันฝรั่งดัดแปรไฮดรอกซีโพพิลสตาร์ช และออกซิไดส์สตาร์ช มาเป่าขึ้นรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ ผลการศึกษาพบว่า ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มสตาร์ชมันฝรั่งธรรมชาติได้ เนื่องจากฟิล์มมีลักษณะเปราะเมื่อถูกลูกกลิ้งหนีบรีด ในขณะที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มสตาร์ชมันฝรั่งดัดแปรได้ ขณะที่ Lopez *et al.* (2013) สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มสตาร์ชจากเทอร์โมพลาสติกเรซินผสมระหว่างสตาร์ชข้าวโพดธรรมชาติและแอซีเทตสตาร์ชข้าวโพดที่มีระดับแอซีทิล 0.01% Dang and Yoksan (2015) สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติเป็นผลสำเร็จ แต่ลักษณะฟิล์มเป็นแบบสองชั้น (double layer) ไม่สามารถแยกจากกันได้จะเห็นว่าชนิดสตาร์ชธรรมชาติและประเภทการดัดแปรสตาร์ชมีผลต่อความสามารถการเป่าขึ้นรูปฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากเทอร์โมพลาสติกเรซิน

Fringant *et al.,* (1998) รายงานว่า สตาร์ชแอซีเทต เป็นสตาร์ชเอสเทอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาแอซีทิเลชันระหว่างเม็ดสตาร์ชกับสารเคมีหมู่แอซีทิล (O=C-CH3) โดยหมู่แอซีทิลจะเข้าไปแทนที่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของสตาร์ชทำให้สตาร์ชดัดแปรมี ความหนืดสูงขึ้น มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น และสีของสตาร์ชมีความสว่างเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มแอซีเทตที่มีระดับการแทนที่ 1.22 ถึง 1.56 เตรียมในระบบน้ำมากพอ ฟิล์มมีลักษณะใส และมีแรงต้านทานการดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการเพาะปลูกมันสำปะหลังและส่งออกผลผลิตแปรรูปมันสำปะหลังมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก (Sriroth *et al.,* 1999) และกระบวนการผลิตสตาร์ชมันสำปะหลังไม่ซับซ้อน เป็นผลให้สตาร์ชมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่มีราคาต่ำ เมื่อเทียบกับสตาร์ชประเภทอื่น และจากที่มีรายงานการเป่าขึ้นรูปฟิล์มสตาร์ช มันสำปะหลังเป็นผลสำเร็จ แต่ฟิล์มที่ได้ยังคงมีลักษณะเป็นสองชั้น จากการสำรวจเอกสารที่ผ่านมาพบว่าการใช้สตาร์ชดัดแปรหมู่ฟังก์ชันอื่นกับสตาร์ชธรรมชาติ ได้แก่ ไฮดรอกซีโพพิล ออกซิไดส์ และแอซีเทต

สตาร์ชเพื่อขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า ผลปรากฏว่าสตาร์ชดัดแปรไฮดรอกซีโพพิล หรือ สตาร์ชออกซิไดส์ยังคงส่งผลให้กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มเป็นไปได้ยากและมีลักษณะเป็นสองชั้น ขณะที่สตาร์ชสตาร์ชข้าวโพดดัดแปรแอซีเทตผสมกับสตาร์ชข้าวโพดธรรมชาติอัตราส่วน 96:4 สามารถขึ้นรูปได้โดยมีลักษณะเป็นชั้นเดียว อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเปอร์เซ็นต์การทดแทนโดยใช้สตาร์ชแอซีเทต สามารถเป่าขึ้นรูปได้และลดความไวต่อความชื้นอยู่ที่ 96 % สตาร์ชแอซีเทตซึ่งจัดว่าสูงเกินไปหากคำนึงถึงต้นทุนการผลิต วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จึงเป็นการปรับปรุงการผลิตฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากสตาร์ชมันสำปะหลัง ให้ได้ฟิล์มชั้นเดียวและลดความไวต่อความชื้น โดยใช้การผสมสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรแบบแอซีเทตที่มีระดับการแทนที่ (degree of substitution)ต่างกันและพยายามลดอัตราส่วนของสตาร์ชดัดแปรให้ได้มากที่สุด รวมถึงศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่เบื้องต้นของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการผสมสตาร์ชดัดแปรเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

สตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติและสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรแอซีเทตสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร ระดับการแทนที่ต่ำ และระดับการแทนที่สูง จากบริษัท เอเชียโมดิฟาย จำกัด ประเทศไทย และกลีเซอรอล เชิงพาณิชย์

การตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติและสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรแอซีเทต

วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนโดยใช้วิธีการเคลดาลและเปลี่ยนค่าไนโตรเจนเป็นร้อยละโปรตีนโดยการคูณค่า converting factor 6.25 (Charles *et al.,* 2007) ตามวิธีการของ AACC(2000) ค่าปริมาณไขมันโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน Soxtec โดยใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์และอะซีโตนเป็นตัวทำละลายตามวิธีการของ AOAC(1995) ปริมาณเถ้าโดยใช้เตาเผาไฟฟ้าที่อุณภูมิ 600±20องศาเซลเซียสตามวิธีการ AACC Method 08-01 (AACC, 2000a) การตรวจสอบระดับการแทนที่ของหมู่แอซีทิลตามวิธีการของ Zurima González and Elevina Pérez (2002) และวิเคราะห์ความชื้นโดยใช้วิธีการอบแห้งตัวอย่างด้วยตู้อบไฟฟ้าลมร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ 105 องศาเซลเซียส ตามวิธีการของ ACC Method 44-15A (AACC, 2000b)

การผลิตเม็ดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยกระบวนการอัดรีดและการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าจากมันสำปะหลังธรรมชาติและมันสำปะหลังดัดแปรแอซีเทต

การเตรียมเม็ดเรซินกระทำโดยใช้สตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติ สตาร์ชมันสำปะหลังแอซีเทตดัดแปร 2 ระดับ ทำการขึ้นรูปเม็ดเรซินในช่วงอัตราส่วนระหว่างสตาร์ชธรรมชาติและสตาร์ชดัดแปรในอัตราส่วน 100:0 (NT100), 70:30 (High AC70NT30) และ 70:30 (Low AC70NT30) ตามลำดับ โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (รุ่น LTE-20-40; Labtech Engineering, Thailand) ตามวิธีของ Khamthong and Lumdubwong (2012) ต่อมานำเทอร์โมพลาสติกเรซินดังกล่าว มาเป่าขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดรีดฟิล์มเป่า แบบblow up (รุ่น LF-400; Labtech Engineering, Thailand) เพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Lopez *et al.* (2013) และ Dang and Yoksan (2015)

สีของเม็ดเรซินและฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

ตรวจวัดค่าสีของตัวอย่างและบันทึกค่าของสีที่วัดได้โดยใช้ระบบ Hunter

สมบัติดรรชนีการหลอมไหลและสมบัติความเสถียรทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเรซิน

วิเคราะห์ความชื้นโดยใช้วิธีการอบแห้งตัวอย่างด้วยตู้อบไฟฟ้าลมร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ 105 องศาเซลเซียส ตามวิธีการของ ACC Method 44-15A (AACC, 2000b) ทำการตรวจสอบดรรชนีการหลอมไหลของเม็ดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (melt flow index, MFI) ตามมาตรฐาน ASTM D1238-10 ด้วยเครื่องทดสอบอัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส Load 5 กิโลกรัม และตรวจสอบสมบัติความเสถียรทางความร้อนของสตาร์ช โดยวางถ้วยเผา (crucible) ลงในเครื่อง Thermo gravimetric analyzer (TGA/DSC1, Mettler Toledo, Switzerland)ใส่ตัวอย่าง 10 มิลลิกรัมลงในถ้วยเผา จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างตั้งแต่ 30-700 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน

สมบัติเชิงกลของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

ตรวจสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม โดยตรวจสอบความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวตามมาตรฐาน ASTM D6380-03 โดยนำตัวอย่างฟิล์มเก็บที่ความชื้นสัมพันธ์ร้อยละ 50±5 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัว โดยใช้ load cell ขนาด 5 กิโลนิวตัน ด้วยความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที

สมบัติการยอมให้ซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

ตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม (water vapor transmission rate, WVTR) โดยนำตัวอย่างเก็บที่ความชื้นสัมพันธ์ร้อยละ 50±5 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำตามวิธีการของ ASTM E 96/E96M-05 แล้วนำไปใส่ในตู้ปรับสภาวะความชื้นและอุณหภูมิ โดยความชื้นสัมพันธ์ร้อยละ 50±2 และอุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส และทำการตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม (oxygen transmission rate,OTR) โดยนำตัวอย่างเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 52 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตามมาตรฐาน ASTM D3985

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การเตรียมตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเรซินและฟิล์มกระทำอย่างน้อยสองครั้ง และการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองทั้งหมด เป็นการวิเคราะห์ของตัวอย่างอย่างน้อย 2 ซ้ำ ยกเว้นการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ใช้ตัวอย่างฟิล์มอย่างน้อย 10 ตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการทดสอบความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีตเม้นต์โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสถิติ SPSS รุ่น 15

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติและมันสำปะหลังดัดแปรแอซีเทต

สตาร์ชธรรมชาติโดยทั่วไปมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่า 0.5% ปริมาณไขมันน้อยกว่า 0.1% และ ปริมาณเถ้าไม่เกิน 0.5% (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2542) จากการตรวจสอบสมบัติของสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติและมันสำปะหลังดัดแปรแอซีเทตสองชนิด พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (Table 1) แต่สตาร์ชดัดแปรมีระดับไขมันและโปรตีนต่ำกว่าสตาร์ชธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ Gonzalez และ Perez (2002) ให้เหตุผลว่ากระบวนการล้างเอาเกลือออกภายหลังการดัดแปรสตาร์ชโดยปฏิกิริยาแอซีทิเลชัน อาจเป็นผลให้ปริมาณไขมันและโปรตีนของสตาร์ชดัดแปรลดลง

สตาร์ชแอซีเทตเป็นสตาร์ชเอสเทอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาแอซีทิเลชัน โดยหมู่แอซีทิล ($O=C-CH_3$) เข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของสตาร์ช ผลการวิเคราะห์หมู่แอซีทิลของสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรสองชนิด (Table 1) พบว่าตัวอย่างทางการค้า มีเปอร์เซ็นต์หมู่แอซีทิลประมาณ 0.86% และ 2.0% และมีระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS เป็น 0.02 และ 0.09 ตามลำดับ โดยหมู่แอซีทิลของสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรทางการค้ายังอยู่ในเกณฑ์ที่อนุญาตให้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร คือมีหมู่แอซีทิลไม่เกินร้อยละ 2.5 (มาตรฐานอุตสาหกรรมเกษตร, 2535)

Table 1 Chemical compositions of native and modified starches

Type of cassava starch	%Moisture	Lipid	Ash	Protein	%Acetyl group	DS
Native	12.54±0.11[b]	0.1±0.0[b]	0.07±0.01[b]	0.32±0.03[a]	0	0
Acetate low DS	13.06±0.07[a]	0.09±0.02[a]	0.11 0.00[a]	0.28 0.00[b]	0.86	0.02
Acetate high DS	13.19±0.05[a]	0.08±0.03[a]	0.16 0.00[a]	0.24±0.00[b]	2.00	0.09

Means in the same row with different letters are significantly different ($P<0.05$).

กระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกเรซินและฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

คณะผู้วิจัยพบว่าสามารถขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกเรซินจากสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติและสตาร์ชดัดแปรโดยใช้กระบวนการอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extrusion) ได้โดยไม่มีปัญหาแต่อย่างใด เส้นเทอร์โมพลาสติกสามารถไหลออกมาได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกเรซินจากสูตรมันสำปะหลังธรรมชาติ และจากสูตรที่มีการผสมระหว่างสตาร์ชธรรมชาติและสตาร์ชดัดแปร ที่ระดับการแทนที่ DS ~0.09 และ 0.02 มาทำการเป่าขึ้นรูปพบว่าสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ทั้ง 3 สูตร (สูตรสตาร์ชธรรมชาติ และสูตรที่ผสมสตาร์ชดัดแปรทั้งสองระดับ) โดยฟิล์มมีลักษณะเป็นชั้นเดียวได้สำเร็จ ดังแสดงใน Figure 1 โดยได้ทำการทดลองขึ้นรูปฟิล์มที่มีสูตรสตาร์ชดัดแปรที่ 100%, 50% และ 70% ตามลำดับพบว่าที่ 50% ฟิล์มยังติดเป็น 2 ชั้นและมีความเหนอะและสูตรที่มีสตาร์ชแอซีเทตที่มีระดับการแทนที่ DS 0.09 พบว่าสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่างต่อเนื่องมากกว่าและเหนอะน้อยกว่าสูตรที่มีสตาร์ชแอซีเทตที่มีระดับการแทนที่ 0.02 อย่างมีนัยสำคัญ veen *et al.,* 2005 ได้รายงานว่าระดับการแทนที่ของหมู่แอซีทิลที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น สำหรับการเป่าฟิล์มและขึ้น

รูปได้อย่างต่อเนื่องเป็นประเด็นสำคัญสำหรับการผลิตฟิล์มในระดับอุตสาหกรรม ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัย จึงตัดสินใจเลือกสูตรเรซินจากสตาร์ชดัดแปรที่มีค่า DS สูงมาทำการศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่อื่นต่อไป โดยคงอัตราการผสมเป็น70:30 (สตาร์ชแอซีเทต/สตาร์ชธรรมชาติ) และใช้ฟิล์มจากสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติเป็นตัวเปรียบเทียบ

Figure 1 Blown Film Extrusion of Thermoplastic Cassava Starch Film

สมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกเรซินจากสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติและมันสำปะหลังดัดแปร

ดรรชนีการหลอมไหลและสมบัติความเสถียรทางความร้อนของเทอร์โมพลาสตาร์ชเรซิน

ค่าดรรชนีการหลอมไหลของเทอร์โมพลาสติกเรซินจากสตาร์ชธรรมชาติและเรซินที่มีส่วนผสมของสตาร์ชดัดแปรต่างกันประมาณ 3 เท่า ดังแสดงค่าใน Table 2 (15.5 g/min *vs* 5.0 g/10min) ค่าดรรชนีการหลอมไหลที่ต่ำกว่าของสตาร์ชดัดแปรเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ดีกว่า (Ren *et al.*, 2009) และสาเหตุที่ค่าดังกล่าวต่ำกว่า อาจอธิบายได้จากค่าความชื้นของเม็ดเรซินสตาร์ชดัดแปรที่ต่ำกว่าสตาร์ชธรรมชาติ (Table 2) หรืออาจมาจากลักษณะโครงสร้างโมเลกุลหรือระดับความเป็นผลึกของสตาร์ชดัดแปรที่ต่างจากสตาร์ชธรรมชาติซึ่งผู้วิจัยจะทำการศึกษาต่อไป เนื่องจากมีรายงานว่า ความหนืดปรากฏของสารละลายสตาร์ชข้าวโพดแอซีเทตที่ความเข้มข้น 4% สูงกว่าสารละลายสตาร์ชข้าวโพดธรรมชาติที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันประมาณเท่าตัวเช่นกัน (Lopez *et al.*, 2008)

เรซินที่มีส่วนผสมของสตาร์ชดัดแปรมีช่วงอุณหภูมิการเสื่อมสลายต่ำกว่าเรซินจากสตาร์ชธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิเริ่มต้น(T_o)และอุณหภูมิสุดท้ายของการเสื่อมสลาย (T_d) (210.9^{o}ซ *vs* 201.9 ^{o}ซ และ 308.1 ^{o}ซ *vs* 305.8^{o}ซ) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามอัตราการสูญเสียมวลของตัวอย่างอยู่ในช่วงเดียวกัน (75.6 – 76.6 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งสอดคล้องกับที่ Colussi *et al.* (2017) รายงานว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายเริ่มต้นและอุณหภูมิการเสื่อมสลายสุดท้ายของฟิล์มสตาร์ชข้าวดัดแปรแอซีเทตที่เตรียมจากระบบน้ำมากเกินพอมีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชข้าวธรรมชาติเช่นกัน แต่ความแตกต่างของอุณหภูมิชัดเจนมากกว่าฟิล์มที่เตรียมจากกระบวนการเป่าขึ้นรูป (To 209 ^{o}ซ *vs* 161 ^{o}ซ และ Tc 295^{o}ซ *vs* 258^{o}ซ) คณะวิจัยให้เหตุผลว่าในระหว่างการทำปฏิกิริยาแอซีทิลเลชัน อาจส่งผลให้เกิดการย่อยสลายโมเลกุลสตาร์ชบางส่วน เป็นผลให้พอลิเมอร์มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้อุณหภูมิการเสื่อมสลายต่ำลง นอกจากนี้หมู่แอซีทิลที่เข้าไปแทนที่ในสาย

โซ่โมเลกุลสตาร์ช อาจส่งผลให้พื้นที่ในสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนได้ดีขึ้น (Medina *et al.*, 2012)

Table 2 Melt flow index and thermal degradation properties of thermoplastic starch resin

Resin	%Moisture	MFI	TGA			
			T_o (°C)	T_p (°C)	T_e (°C)	% Mass change
NT100	4.50±0.06[b]	15.5±0.64[b]	210.9±1.2[b]	308.1±0.0[b]	394.7±0.8[b]	-75.6±1.7[a]
High AC70NT30	3.45±0.05[a]	5.0±0.39[a]	201.9±2.5[a]	305.8±0.9[a]	390.6±0[a]	-76.6±0.3[a]

Means in the same row with different letters are significantly different (P<0.05).

สีของเทอร์โมพลาสติกเรซินและฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

เทอร์โมพลาสติกเรซินที่มีส่วนผสมของสตาร์ชดัดแปรแอซีเทตมีค่าความสว่าง (L*) สูงกว่า แต่มีสีแดง (ค่าa*) และสีเหลือง (ค่า b*) ต่ำกว่าเรซินจากสตาร์ชธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) (Figure 2a) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานว่าสตาร์ชมันสำปะหลังแอซีเทตมีค่าความสว่าง (L*) เพิ่มขึ้น แต่มีค่าสีเหลือง (b*) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ (Mbougueng *et al.*,2012) เมื่อนำเรซินมาเป่าขึ้นรูปได้เป็นฟิล์มสตาร์ช พบว่าค่าความสว่างของฟิล์มสตาร์ชธรรมชาติและสตาร์ชดัดแปรไม่ต่างกัน ขณะที่ค่าสีแดง (a*) ของฟิล์มสตาร์ชดัดแปรสูงกว่าฟิล์มสตาร์ชธรรมชาติเล็กน้อย ($p < 0.05$) แต่ค่าสีเหลือง (b*) ของฟิล์มสตาร์ชดัดแปรยังคงต่ำกว่าฟิล์มสตาร์ชธรรมชาติเช่นเดียวกันกับเรซิน (Figure 2b) ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจมาจากระดับโปรตีนที่ลดลงของสตาร์ชดัดแปรเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ(Table 1) ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) ได้ต่ำกว่า ดังที่ Adebowale et al. (2006) รายงานไว้ว่าปริมาณโปรตีนในสตาร์ชที่สูงกว่า 0.35 % สามารถเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ง่าย

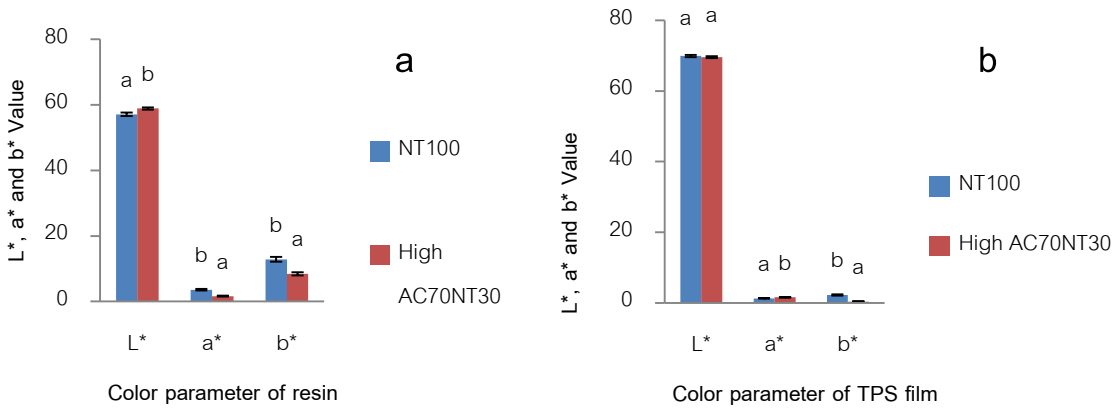


Figure 2 Color of thermoplastic resins (a) and color of TPS films (b)

สมบัติเชิงกลของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

ฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติและสตาร์ชแอซีเทตในงานวิจัยนี้ มีความชื้น ~9% และความหนา ~0.09 - 0.13 มิลลิเมตร ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์คำจำกัดความของฟิล์ม ที่ต้องมีความหนาไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร (ตามมาตรฐาน ASTM D6988-03) กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Figure 2)แสดงให้เห็นว่าฟิล์มทั้งสองชนิดไม่มีจุดคราก (Yield) ไม่มีการคอดลง (Necking) และมีความเค้นสูงสุดเป็นจุดเดียวกันกับความเค้น ณ จุดแตกหัก พิสัยของความเค้นดึง (tensile strength) ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติและสตาร์ชดัดแปรอยู่ในช่วงระหว่าง 0.5-1.8 MPa โดยฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชดัดแปรมีค่าความเค้นดึงสูงกว่าสตาร์ชธรรมชาติประมาณ 3 เท่า ทั้งนี้ฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมันสำปะหลังสามารถยืดตัวได้มาก เพราะค่าร้อยละการยืดตัว (% elongation) เกิน 100% และฟิล์มที่มีสตาร์ชดัดแปรผสมอยู่มีค่าร้อยละการยืดตัวเพิ่มขึ้นจาก 142.74 เป็น 163.04 % (Figure 3) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าโมดูลัส (Young's modulus) ของฟิล์มจากสตาร์ชดัดแปรเพิ่มขึ้นจาก 3.4 เป็น 6.4 MPa ($p<0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมสตาร์ชมันสำปะหลังแอซีเทตกับสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงและมีความสามารถในการยืดตัวได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Jiang *et al.* (2006), Lopez *et al.*(2013) และ Mina *et al.*,(2011) ที่แสดงว่าฟิล์มที่มีส่วนผสมของสตาร์ชแอซีเทตมีค่าความเค้นดึงและค่าร้อยละการยืดตัวเพิ่มขึ้น และลดความแข็งเปราะของฟิล์มสตาร์ชธรรมชาติ

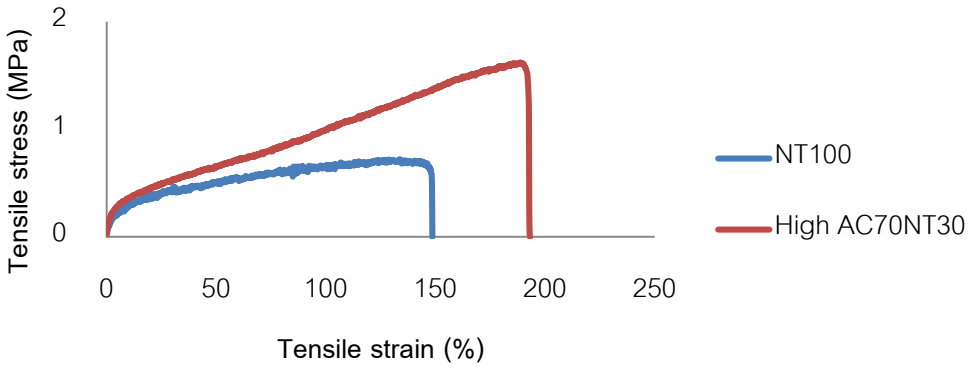


Figure 3 Mechanical properties of TPS films

สมบัติการยอมให้ไอน้ำซึมผ่านและการยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

การผสมสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรแอซีเทตส่งผลให้สมบัติการยอมให้ไอน้ำซึมผ่านของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลง จาก 1.97×10^{3} g.mil /day.m^2.atm เป็น 1.57×10^{3} g.mil /day.m^2.atm ($p < 0.05$) (Table 3) โดยช่วงค่าดังกล่าวของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติใกล้เคียงกับที่ Dang และ Yoksan (2016) ได้รายงานไว้ (1.63×10^{3} g.mil /day.m^2.atm) ปรากฏการณ์ที่ค่าการยอมให้ไอน้ำซึมผ่านของฟิล์มสตาร์ชแอซีเทตที่เตรียมจากกระบวนการเป่าขึ้นรูปลดลง เป็นไปในทางเดียวกันกับที่ Colussi *et al.* (2017) ซึ่งได้เตรียมฟิล์มสตาร์ชแอซีเทตที่มีระดับการแทนที่ต่างกัน จากกระบวนการหล่อแบบ (casting) และพบว่าระดับการแทนที่ของหมู่แอซีทิลแปรผกผันกับสภาพซึมผ่านของไอน้ำ เช่นเดียวกันกับ Lopez *et al.* (2013) ได้รายงานว่าฟิล์มจากสตาร์ชข้าวโพดธรรมชาติกับสตาร์ชข้าวโพดดัดแปรแอซีเทต และขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า มีค่าสภาพการซึมผ่านไอน้ำซึมผ่านลดลง จาก 4.18×10^{4}เป็น 3.07×10^{4} g.mil/m^2.day.atm คณะผู้วิจัยให้เหตุผลว่าหมู่แอซีเทต

ที่เข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชส่งผลให้เกิดความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่าอัตราการยอมให้ไอน้ำซึมผ่านลดลง

จากการสำรวจเอกสารพบว่า มีการศึกษาสมบัติการยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าฟิล์มอยู่น้อยมาก และค่าที่รายงานอยู่ในช่วงกว้าง (4.13×10^{-10}-3.31×10^{10} cm^3/m.s.Pa (Lopez *et al.,* 2013) ในงานวิจัยปัจจุบันพบว่าอัตราการยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้สตาร์ชมันสำปะหลังแอซีเทตผสมขึ้นรูปกับสตาร์ชธรรมชาติ โดยเพิ่มขึ้น จาก 302 cc.mil/m^2.day.atm เป็น 583 cc.mil/m^2.day.atm ทั้งนี้โครงสร้างทางจุลภาคและระดับความเป็นผลึกของฟิล์มน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้สมบัติการยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านมีค่าสูงขึ้น ซึ่งคณะผู้วิจัยจะทำการศึกษาต่อไป

Table 3 Oxygen permeability (OP) and Water vapor permeability (WVP) of thermoplastic starch film

TPS Films	Thickness (mm.)	%Moistures	ค่า OP (cc.mil/m^2.day.atm)	ค่า WVP (g.mil/day*m^2.atm)
NT100	0.09 ± 0.00^a	8.73 ± 0.45^a	302.00 ± 23.96^a	1.97×10^{3b}
High AC70NT30	0.13 ± 0.01^b	9.97 ± 0.93^b	583.19 ± 39.71^b	1.57×10^{3a}

Means in the same row with different letters are significantly different ($P<0.05$).

สรุป

ระดับการแทนที่ของหมู่แอซีเทตสูงสามารถขึ้นรูปฟิล์มเทอร์โมพลาสติกได้ดีกว่าระดับต่ำ และเทอร์โมพลาสติกเรซินจากสตาร์ชมันสำปะหลังแอซีเทตผสมกับสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติ มีค่าดรรชนีการหลอมไหลลดลง เรซินเหลืองน้อยลง และอุณหภูมิการเสื่อมสลายต่ำกว่าเรซินจากสตาร์ชธรรมชาติ เมื่อนำเรซินดังกล่าว มาเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พบว่าสามารถเตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช มันสำปะหลังชั้นเดียวได้เป็นผลสำเร็จ ฟิล์มที่มีส่วนผสมของสตาร์ชดัดแปรมีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและค่าร้อยละการยืดตัวเพิ่มขึ้น มีสมบัติการยอมให้ไอน้ำซึมผ่านดีขึ้น แต่ประสิทธิการยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านที่แย่ลง

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2543. **เทคโนโลยีแป้ง**. ภาควิชา เทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2535. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร**. มอก. 1073-2535

AACC Internation Approves methods of analysis (10th ed.).

Dang K. M. and Yoksan R. 2015. Development of thermoplastic starch blown film by incorporating plasticized chitosan **Carbohydrate Polymers** 115; 575-581

Dang K. M. and Yoksan R. 2016. Morphological characteristics and barrier properties of thermoplastic starch/chitosan blown film. **Carbohydrate Polymers** 40 – 47

González, Z. and E. Pérez. 2002. Effect of Acetylation on Some Properties of Rice Starch. **Starch - Stärke**. 54 (3-4): 148-154.

Khamthong P and Lumdubwong N. **Carbohydrate Polymers** 2012;90:340-347.

Lim, S. T., E. H. Chang and H. J. Chung. 2001. Thermal Transition Characteristics of Heat–Moisture Treated Corn and Potato Starches. **Carbohydrate Polymers**. 46 (2): 107-115.

Liu, H., F. Xie, L. Yu, L. Chen and L. Li. 2009. Thermal Processing of Starch-Based Polymers. **Progress in Polymer Science**. 34 (12): 1348-1368.

López, O. V., M. A. García and N. E. Zaritzky. 2008. Film Forming Capacity of Chemically Modified Corn Starches. **Carbohydrate Polymers**. 73 (4): 573-581.

López, O. V., N. E. Zaritzky, M. V. E. Grossmann and M. A. García. 2013. Acetylated and Native Corn Starch Blend Films Produced by Blown Extrusion. **Journal of Food Engineering**. 116 (2): 286-297.

Medina O. , Pardo H. O. and Ortiz A. C. 2012. Modified arracacha starch films charachterization and its potential utilization as food packaing pags 186 -196

Mina, J., A. Valadez-Gonzalez, P. Herrera-Franco, F. Zuluaga and S. Delvasto. 2011. Physicochemical Characterization of Natural and Acetylated Thermoplastic Cassava Starch. **DYNA**. 78 174-182.

Robert Shanks and Ing Kong (2012). Thermoplastic Elastomers, Thermoplastic Elastomers, Prof. Adel El-Sonbati (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/36807. Available from: https://www.intechopen.com/books/thermoplastic-elastomers/thermoplastic-elastomers

Sriroth, K., V. Santisopasri, C. Petchalanuwat, K. Kurotjanawong, K. Piyachomkwan and C. G. Oates. 1999. Cassava Starch Granule Structure–Function Properties: Influence of Time and Conditions at Harvest on Four Cultivars of Cassava Starch. **Carbohydrate Polymers**. 38 (2): 161-170.

Thunwall, M., V. Kuthanová, A. Boldizar and M. Rigdahl. 2008. Film Blowing of Thermoplastic Starch. **Carbohydrate Polymers**. 71 (4): 583-590

Vee V., Pajander J., K. Z. , R.L., A. P. H.W. and K.J The effect of powder blend and tablet structure on drug release mechanisms of hydrophobic starch acetate matrix. 2005 tabletsEuropean,. **Pharmaceutics and Biopharmaceutics** Volume 61, Issue 3

Zullo, R. and S. Iannace. 2009. The Effects of Different Starch Sources and Plasticizers on Film Blowing of Thermoplastic Starch: Correlation among Process, Elongational Properties and Macromolecular Structure. **Carbohydrate Polymers**. 77 (2): 376-383.

ผลของมอลติทอลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของแยมเสาวรสพลังงานต่ำ

Effect of Maltitol on Physical and Chemical Properties of Low Calorie Passion Fruit Jam

ธิดารัตน์ หน่อสุวรรณ[1*] และ เสาวณีย์ ตันเตชัย[1]

Tidarat Norsuwan[1*] and Saowani Tantechai[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของแยมเสาวรสพลังงานต่ำ โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำตาลซูโครสต่อมอลติทอลเท่ากับ 100:0, 80:20, 70:30, 50:50 และ 0:100 ตามลำดับ พบว่าแยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอลที่อัตราส่วนของมอลติทอลเพิ่มขึ้น มีค่าความสว่าง (L*) และค่าสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ค่าแรงต้านการกด (g-force) ค่าความเหนียว (g-force) ค่าแรงเฉือน (N) และค่าการยึดเกาะ (N) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอลช่วง 0-30% มีค่าแรงต้านการกดไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) นอกจากนี้ แยมเสาวรสพลังงานต่ำมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.23-3.24 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้เท่ากับ 68.1-68.5 องศาบริกซ์ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเท่ากับ 45.66-48.66% และมีค่าพลังงานเท่ากับ 1.45-1.55 kcal/g โดยการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอล 100% มีค่าพลังงานลดลง 6.5%

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effects of sucrose substitution with maltitol on physical and chemical properties of low calorie passion fruit jam. The sucrose to maltitol ratios were 100:0, 80:20, 70:30, 50:50 and 0:100 respectively. It was found that the increasing of maltitol ratio in the sucrose substituted low calorie passion fruit jam, the lightness (L*) and yellowness (b*) were significantly increased ($p \leq 0.05$). The hardness (g-force), stickiness (g-force), work of shear (N) and work of adhesion (N) were significantly decreased ($p \leq 0.05$). The sucrose substitution with maltitol 0-30%, the hardness had no significantly different ($p > 0.05$). Furthermore, the acid-base value, total soluble solid content, total sugar content and energy value of low calorie passion fruit jam were about 3.23-3.24, 68.1-68.5 °Brix, 45.66-48.66% and 1.45-1.55 kcal/g respectively. The sucrose substitution with maltitol 100%, the energy value was decreased 6.5%

Key Words: maltitol, low calorie, passion fruit, jam, sugar substitution

* Corresponding author; e-mail address: tidarat_oh23@hotmail.com

[1]ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300

[1]Department of Agro-Industry, Faculty of Agricultural Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai 50300

คำนำ

แยม (Jam) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากผัก ผลไม้ หรือสมุนไพรชนิดเดียวกันหรือตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ผสมกับสารที่ให้ความหวาน อาจผสมกรดซิตริก เพคติน น้ำผลไม้หรือผลไม้เข้มข้นด้วยก็ได้แล้วทำให้มีความหนืดพอเหมาะ (มผช.342/2547) แยมเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูง โดยมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบมากกว่า 40% ของน้ำหนักทั้งหมด และ 80% ของของแข็งทั้งหมดในแยมมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของแยม (Kerdsup and Naknean, 2013) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบสูงในผลิตภัณฑ์แยมอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคฟันผุ โรคอ้วน และโรคไม่ติดต่อเรื้อรังที่มากับความอ้วน เช่น โรคไขมันในเลือดสูง โรคเบาหวาน และโรคหัวใจ เป็นต้น แยมที่ขายตามท้องตลาดบางยี่ห้อมักเป็นเยลลี่ปรุงแต่ง มีน้ำตาลปริมาณที่สูง มีสารกันบูด วัตถุปรุงแต่งอาหาร สารเคมีปนเปื้อนอยู่ ทำให้สารตกค้างในร่างกายและเกิดโรคต่างๆ ตามมา ก่อให้เกิดผลกระทบต่อร่างกาย ทำให้ได้รับสารอาหารที่ไม่ดีต่อสุขภาพ (ประภาศรี, 2551)

เสาวรส (Passion fruit) เป็นผลไม้เพื่อสุขภาพชนิดหนึ่ง ผลมีลักษณะกลม ผลที่สุกจะมีสีม่วงเข้ม สีเหลือง ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ มีกลิ่นหอมเฉพาะ มีรสเปรี้ยว ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำเสาวรส ประกอบด้วยน้ำประมาณ 76-85% ของแข็งที่ละลายได้ ประมาณ 17.4% คาร์โบไฮเดรตประมาณ 12.4% กรดอินทรีย์ประมาณ 3.4% นอกจากนี้มีแคโรทีนอยด์ สารประกอบไนโตรเจน วิตามิน และแร่ธาตุต่างๆ รวมทั้งเอนไซม์ เสาวรสมีวิตามินเอ ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะสารแคโรทีนอยด์ จึงช่วยบำรุงสายตาและผิวพรรณ มีวิตามินซีค่อนข้างสูง คือ 39.1 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำเสาวรส ซึ่งมากกว่าที่พบในมะนาว และพบสาร Albumin-homologous protein จากเมล็ดของผลเสาวรสซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ และยังมีสรรพคุณช่วยแก้อาการนอนไม่หลับ ลดไขมันในเส้นเลือดและโรคกระเพาะปัสสาวะอักเสบ (สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2552)

มอลติทอล (Maltitol) เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ มีความหวานประมาณ 85-95% หรือประมาณ 0.9 ของน้ำตาลซูโครส ค่าพลังงานของมอลติทอลมีค่าน้อยกว่าน้ำตาลซูโครส ประมาณ 30-50% หรือประมาณ 2.0-3.8 kcal/g โดยค่าพลังงานของน้ำตาลซูโครสที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์กลุ่มลูกกวาดและขนมหวานมีค่าเท่ากับ 4 kcal/g (Dobreva, *et al*., 2013) มอลติทอลมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก (Prebiotic) ช่วยปรับสภาพระบบขับถ่าย ช่วยให้ร่างกายดูดซึมแร่ธาตุได้ง่าย ช่วยให้อาหารเงางามขึ้น น้ำตาลไม่ตกผลึกเมื่อโดนความร้อน ช่วยรักษาคุณภาพของอาหาร และเครื่องดื่ม นิยมนำมาใช้ในอาหารประเภท ลูกอม แยม เบเกอรี่ ไอศกรีม ปราศจากน้ำตาล มอลติทอลใช้เป็นสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลที่มีพลังงานต่ำในเครื่องดื่มพลังงานต่ำที่เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก และผู้ป่วยโรคเบาหวาน ไม่ทำให้ฟันผุ มอลติทอลดูดซึมได้ช้ากว่า ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดขึ้นช้ากว่าน้ำตาลซูโครส หรือ กลูโคส เหมาะที่จะนำมาแปรรูปอาหารเพื่อสุขภาพ (สุขใจ, 2555) โดยมอลติทอลถูกดูดซึมในร่างกายประมาณ 50–75% (Dobreva, *et al*., 2013)

ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำตาลซูโครสต่อมอลติทอลที่มีผลต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอล

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างแยมเสาวรส

แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอล ที่อัตราส่วนระหว่างน้ำตาลซูโครสและมอลติทอล เท่ากับ 100:0, 80:20, 70:30, 50:50 และ 0:100 ตามลำดับ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และเปรียบเทียบการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำด้วยวิธี Duncan 's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลการคำนวณทางสถิติ SPSS

สูตรพื้นฐานของแยมเสาวรสพลังงานต่ำ ประกอบด้วย น้ำเสาวรส 76.7% น้ำตาลซูโครส 23% และเพคตินชนิด Low methoxyl pectin 0.3% นำส่วนผสมมาคนผสมรวมกันและใส่ลงในกระทะทองเหลืองตั้งไฟที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการเคี่ยวอย่างต่อเนื่อง ในระหว่างการเคี่ยวทำการวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดจนได้ค่ามากกว่า 60 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส บรรจุลงขวดโหลสะอาดที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปิดฝาให้สนิทแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมีต่อไป

ศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำมีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอล

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำ โดยการวัดค่าสีตัวอย่างแยมเสาวรสพลังงานต่ำ ด้วยเครื่อง Chroma Meter (Konica Minolta, 2016) การวัดค่าเนื้อสัมผัสโดยการวัดค่าแรงกดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, TA.XT.plus) โดยใช้หัววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ลงและขึ้นของหัวกดทำการกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้ Pre Test Speed : 2.0 มิลลิเมตร/วินาที Test Speed : 1.7 มิลลิเมตร/วินาที Post Test Speed : 10.0 มิลลิเมตร/วินาที เตรียมตัวอย่างแยมที่อุณหภูมิห้อง ในพิมพ์สแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 มิลลิเมตร ตัดออกมาได้แยมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 มิลลิเมตร สูงประมาณ 15 มิลลิเมตร นอกจากนี้ ทำการวัดค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (Water activity) ของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้

การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำ โดยการวัดการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่าน้ำตาลรีดิวซ์ ค่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และค่าพลังงานในอาหาร (A.O.A.C., 2000)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอลต่อคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำ

การวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอล ที่อัตราส่วนระหว่างน้ำตาลซูโครสและมอลติทอลทั้งหมด 5 อัตราส่วนเท่ากับ 100:0, 80:20, 70:30, 50:50 และ 0:100 ตามลำดับ ผลของการทดลอง พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณมอลติทอลมากขึ้นส่งผลให้ค่า L*, a* และค่า b* มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (Table 1)

Table 1 Effect of maltitol substitution on color values of low calorie passion fruit jam

Sucrose : Maltitol	Color		
	L*	a*	b*
100:0	21.86±0.40^{d}	1.91±0.04^{c}	2.32±0.15^{e}
80:20	23.13±0.19^{c}	2.07±0.05^{b}	2.57±0.03^{d}
70:30	23.63±0.22^{c}	2.13±0.08^{b}	2.78±0.00^{c}
50:50	24.43±0.02^{b}	2.01±0.08^{bc}	3.04±0.04^{b}
0:100	27.04±0.13^{a}	4.08±0.02^{a}	7.37±0.08^{a}

Means in columns not followed by the same superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

ผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่ใช้มอลติทอลทดแทนน้ำตาลซูโครสมีค่าความสว่าง (L*) มากกว่าการใช้น้ำตาลซูโครสเนื่องจากมอลติทอลจัดเป็นน้ำตาลนอนรีดิวซ์ คือไม่มีหมู่รีดิวซ์ และไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (สุขใจ, 2555) นอกจากนี้ น้ำตาลซูโครสสามารถเกิดปฏิกิริยาคาราเมไลเซชัน (Caramelization) ซึ่งเกิดจากการใช้ความร้อนสูงสลายโมเลกุลของน้ำตาลให้แยกออก (Thermolysis) และเกิดพอลิเมอไรเซชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาล ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่จะมีพันธะคู่และเป็นวงแหวน (Anhydro ring) มีความข้นหนืด และมีสีเข้มขึ้น (นิธิยา, 2545) ดังนั้นผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่ใช้มอลติทอลทดแทนน้ำตาลซูโครสจะเกิดปฏิกิริยาคาราเมไลเซชันของน้ำตาลซูโครสได้ลดลง ทำให้สีของแยมมีค่าความสว่าง (L*) มากขึ้น แต่สำหรับค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) มีค่ามากขึ้นเมื่อมีการทดแทนน้ำตาลซูโครสในแยมด้วยมอลติทอลมากขึ้นเนื่องจากค่าความสว่าง (L*) มากขึ้น นอกจากนี้การผลิตแยมเสาวรสพลังงานต่ำมีการใช้ความร้อนในการเคี่ยวจนปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของแยมทุกสูตรที่มีการทดแทนน้ำตาลอยู่ในช่วง 68.1-68.5 องศาบริกซ์ ซึ่งอาจใช้ระยะเวลาในการผลิตไม่เท่ากัน ส่งผลให้สารเบต้าแคโรทีนซึ่งเป็นสารกลุ่มแคโรทีนอยด์และเป็นสารสีหลักในน้ำเสาวรสที่เป็นองค์ประกอบหลักของแยมไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นรูปแบบอื่น จึงทำให้แยมเสาวรสพลังงานต่ำมีค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (Kerdsup and Naknean, 2013)

การวัดค่าเนื้อสัมผัส ได้แก่ ค่าแรงต้านการกด (Hardness) แรงเฉือน (Work of shear) ความเหนียว (Stickiness) และการยึดเกาะ (Work of adhesion) (Table 2) และคุณภาพทางกายภาพ-เคมี ได้แก่ ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (Water activity) ค่าปริมาณความชื้น (Moisture content) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid) (Table 3) ของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอล

Table 2 Effect of maltitol substitution on texture of low calorie passion fruit jam

Sucrose : Maltitol	Hardness (g-force)	Work of shear (N)	Stickiness (g-force)	Work of adhesion (N)
100:0	2.57±0.02 [a]	4.72±0.01 [a]	-0.21±0.01 [a]	-0.70±0.01 [a]
80:20	2.55±0.01 [a]	4.55±0.01 [b]	-0.20±0.01 [b]	-0.66±0.01 [b]
70:30	2.45±0.01 [a]	4.32±0.01 [c]	-0.17±0.01 [c]	-0.65±0.01 [c]
50:50	2.14±0.03 [b]	4.02±0.01 [d]	-0.13±0.01 [d]	-0.62±0.01 [d]
0:100	2.01±0.02 [c]	3.73±0.01 [e]	-0.12±0.01 [e]	-0.54±0.01 [e]

Means in columns not followed by the same superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของแยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอลพบว่า การเพิ่มปริมาณมอลติทอลมีผลทำให้ค่าแรงต้านการกด ค่าความเหนียว ค่าแรงเฉือน และค่าการยึดเกาะ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยแยมเสาวรสพลังงานต่ำสูตรที่ไม่มีการลดปริมาณน้ำตาลซูโครส และสูตรที่มีการเพิ่มปริมาณมอลติทอลช่วง 0-30% พบว่ามีค่าแรงต้านการกดไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) และเมื่อทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอลในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 30% พบว่าค่าแรงต้านการกดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเหนียว ค่าแรงเฉือน และค่าการยึดเกาะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มปริมาณการทดแทนด้วยมอลติทอลมากขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารที่มีส่วนประกอบของน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ น้ำตาลจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และให้ลักษณะความเป็นเนื้อ (Body) เพราะการใช้น้ำตาลในสารละลายจำนวนมาก ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความหนืดและความเป็นเนื้อ แต่ถ้าผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบของสารให้ความหวานแทนน้ำตาล เช่น มอลติทอล ผลิตภัณฑ์จะมีความหนืดและความเป็นเนื้อน้อยลง (อัจฉรา, 2556) นอกจากนี้ ระบบการเกิดเจลของเพคตินชนิดเมทอคซิลต่ำในแยม มีปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลอยู่ 3 ปัจจัย คือ ปริมาณน้ำตาลซูโครส ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณเพคติน (นิภาพร และคณะ, 2545) การเกิดเจลขึ้นอยู่กับปริมาณกรดและน้ำตาลที่ใช้ในส่วนผสมของอาหาร โดยผลไม้ที่นำมาทำแยมควรมีค่า pH หรือปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 2.8-3.2 ปริมาณน้ำตาลหรือของแข็งที่ละลายได้อยู่ในช่วง 65-70% จะช่วยให้เพคตินในโมเลกุลน้ำสามารถเกิดการกระจายตัวได้ดี เกิดโครงสร้างร่างแหของเพคตินที่แข็งแรง และเจลที่ได้จะมีความคงตัวดี (อัจฉรา, 2556) โดยน้ำตาลจะช่วยทำให้เกิดเจลด้วยการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเพคติน ซึ่งน้ำตาลมีหมู่ไฮดรอกซิลจึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเพคตินเป็นอิสระจึงเกิดพันธะไฮดรอกซิลกับโมเลกุลอื่นได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้เกิดพันธะระหว่างกลุ่มเมทิลเอสเทอร์ในโมเลกุลเพคตินด้วย โดยความแข็งแกร่งของร่างแห มีผลจากความเข้มข้นของน้ำตาลและสภาพความเป็นกรด หากความเข้มข้นของน้ำตาลในแยมสูงจะช่วยดูดน้ำออกจากโมเลกุลของเพคตินทำให้เพคตินละลายได้น้อยลง เพคตินจึงเกิดเป็นร่างแหทำให้เจลแข็งแรงขึ้น (นงลักษณ์, 2557) ดังนั้นเมื่อมีการลดปริมาณน้ำตาลในแยมลงจึงทำให้โครงสร้างของเจลไม่แข็งแรง เกิดเจลที่นิ่ม จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้มอลติทอล มีค่าแรงต้านการกด ค่าแรงเฉือน ค่าความเหนียว และการยึดเกาะ ที่ลดลงดังกล่าว ค่าการยึดเกาะ คือ พลังงานที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างอาหารกับพื้นผิวใดที่สัมผัสอยู่ ยิ่งมีค่าติดลบมากต้องใช้แรงในการดึงมาก ผลิตภัณฑ์จะสามารถเกาะติดบนขนมปังได้ก็ต่อเมื่อต้องใช้แรงปาดหรือทา ดังนั้นการลดปริมาณน้ำตาลลงจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งลดลง และการทาผลิตภัณฑ์บนขนมปังจะทาง่ายเนื่องจากโครงสร้าง

ภายในผลิตภัณฑ์ไม่แข็งแรง (นงลักษณ์, 2557) นอกจากนี้ ถึงแม้โครงสร้างทางเคมีของมอลติทอลมีหมู่ไฮดรอกซิล 9 หมู่ที่สามารถรวมกับพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ จึงรวมกับพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ดีกว่าน้ำตาลซูโครส แต่ความสามารถในการละลายของซูโครสเท่ากับ 67 กรัม/ 100 กรัมน้ำ และมอลติทอลเท่ากับ 60-65 กรัม/ 100 กรัมน้ำ (สุขใจ, 2555) ทำให้น้ำตาลซูโครสรวมกับพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่า ซึ่งช่วยดูดน้ำออกจากโมเลกุลของเพคติน ทำให้เพคตินละลายได้น้อยลง เพคตินจึงเกิดเป็นร่างแหทำให้เจลแข็งแรงขึ้น นอกจากนี้น้ำตาลซูโครสสามารถเกิดปฏิกิริยาคาราเมไลเซชันได้สารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่จะมีพันธะคู่และเป็นวงแหวน (anhydro ring) มีความข้นหนืด และมีสีเข้มขึ้น (นิธิยา, 2545) ดังนั้นแยมที่มีการใช้น้ำตาลซูโครสลดลงและใช้มอลติทอลเพิ่มมากขึ้นจึงมีโครงสร้างที่แข็งแรงน้อยลง

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ-เคมีของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอล พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 3.23-3.24 ปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.62-0.72 ปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 16.78-18.10% ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้อยู่ในช่วง 68.1-68.5 องศาบริกซ์ (Table 3)

การเพิ่มปริมาณมอลติทอลไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอล เนื่องจากผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำมีส่วนผสมของน้ำเสาวรสที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณเท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่า แยมเสาวรสพลังงานต่ำมีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการเกิดเจลของเพคตินชนิดเมทอกซิลต่ำ คือ 2.9-5.5 (ดุษฎี และคณะ, 2556) และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการเกิดโครงสร้างเจลที่แข็งแกร่ง (นิภาพร และคณะ, 2545)

Table 3 Effect of maltitol substitution on chemical properties of low calorie passion fruit jam

Sucrose : Maltitol	pH^{ns}	Water activity (a_w)	Moisture content (%)	Total soluble solid (°Brix)^{ns}
100:0	3.24±0.01	0.62±0.02^{c}	16.78±0.01^{e}	68.6±0.23
80:20	3.23±0.00	0.62±0.00^{c}	17.85±0.00^{d}	68.5±0.00
70:30	3.23±0.01	0.66±0.00^{b}	17.88±0.00^{c}	68.3±0.23
50:50	3.23±0.01	0.67±0.01^{b}	17.95±0.01^{b}	68.1±0.25
0:100	3.23±0.01	0.72±0.00^{a}	18.10±0.00^{a}	68.3±0.23

Means in columns not followed by the same superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

ns.: there are no significant differences.

นอกจากนี้ พบว่าการเพิ่มปริมาณมอลติทอลส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (Water activity) และปริมาณความชื้น (Moisture content) ของแยมเสาวรสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากมอลติทอลเป็นสารกลุ่มพอลิออล โครงสร้างทางเคมีของมอลติทอลมีหมู่ไฮดรอกซิล 9 หมู่รวมกับพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล (สุขใจ, 2555) จึงจับกับโมเลกุลของน้ำได้ดี ดังนั้น แยมที่มีปริมาณมอลติทอลเพิ่มขึ้น จึงมีค่าปริมาณความชื้นสูงกว่าแยมที่ใช้น้ำตาลซูโครส

นอกจากนี้ การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอล พบว่ามีค่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดอยู่ในช่วง 45.66-48.66% ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ อยู่ในช่วง 22.16-27.66% ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ อยู่ในช่วง 21.00-23.50% และมีค่าพลังงาน อยู่ในช่วง 1.45-1.55 (kcal/g) (Table 4)

ผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอล เมื่อลดปริมาณน้ำตาลซูโครสลงโดยการทดแทนด้วยมอลติทอล พบว่าไม่มีผลต่อค่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ($p>0.05$) ซึ่งมอลติทอลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำตาลซูโครสจึงสามารถใช้แทนได้ในปริมาณ 1ต่อ1 ความหวานประมาณ 85-95% น้ำตาลซูโครสจัดเป็นน้ำตาลนอนรีดิวซ์ เนื่องจากไม่มีหมู่แอลดีไฮด์หรือคีโทนอิสระซึ่งทำหน้าที่เป็นรีดิวซิงเอเจนต์ เมื่อน้ำตาลซูโครสถูกไฮโดรไลซ์ได้เป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรักโทสจึงจะมีสมบัติเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ (สุขใจ, 2555) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ของแยมเสาวรสที่มีการใช้มอลติทอลเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงเนื่องจากมอลติทอลเป็นน้ำตาลนอนรีดิวซ์ (Non Reducing Sugar) ที่มีความคงทนต่อกรดและความร้อนได้ดีกว่าน้ำตาลซูโครส (สุภาพร, 2554)

Table 4 Effect of maltitol substitution on total sugar and calories of low calorie passion fruit jam

Sucrose : Maltitol	Total sugar (%)^{ns}	Reducing sugar (%)	Non Reducing sugar (%)	Calories (kcal/g)
100:0	48.66±0.02	27.66±0.23^{a}	21.00±0.70^{c}	1.55±0.01^{a}
80:20	48.16±0.01	27.30±0.14^{a}	20.86±0.09^{c}	1.52±0.01^{a}
70:30	47.33±0.01	25.43±0.09^{b}	21.90±0.69^{bc}	1.51±0.00^{b}
50:50	46.00±0.00	23.83±0.23^{c}	22.16±0.28^{b}	1.50±0.00^{b}
0:100	45.66±0.00	22.16±0.23^{d}	23.50±0.50^{a}	1.45±0.00^{c}

Means in columns not followed by the same superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

ns.: there are no significant differences.

การเพิ่มปริมาณมอลติทอลทำให้ค่าพลังงานของแยมเสาวรสลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าพลังงานในช่วง 1.45-1.55 kcal/g

สรุป

แยมเสาวรสพลังงานต่ำที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลติทอลในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่าง (L*) และค่าสีเหลือง (b*) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และค่าแรงต้านการกด ค่าความเหนียว ค่าแรงเฉือน และค่าการยึดเกาะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์แยมเสาวรสพลังงานต่ำยังมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.23-3.24 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้เท่ากับ 68.1-68.5 องศาบริกซ์ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเท่ากับ 45.66-48.66% และมีค่าพลังงานเท่ากับ 1.45-1.55 kcal/g

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนทรัพยากรและสถานที่ในการวิจัย และให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

ดุษฎี อุตภาพ และนุช เจริญกูล. 2556. **สมบัติทางเคมีของคาร์โบไฮเดรท ไฮโดรคอลลอยด์ และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นงลักษณ์ งามพีระพงศ์. 2557. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์แยมกระเจี๊ยบแดงลดน้ำตาล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2545. **เคมีอาหาร**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ.

นิภาพร จรุงล้ำเลิศ, ศศิปะภา แสงฉาย, สุกัญญา เชี่ยงจง และหงส์ ลีลาศุภกร. 2545. **สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพคตินจากเปลือกฝรั่ง**. วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมกระบวนการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ประภาศรี ศิริจักรวาล. 2551. “**การบริโภคไขมัน น้ำตาลและเกลือ**”. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.inmu.mahidol.ac.th/th/knowledge/. (15 พฤศจิกายน 2560).

วิศนี วรรณนิยม. 2552. **การพัฒนาแยมเสาวรสโดยใช้เพคตินจากเปลือกเสาวรส**. สาขาวิชาการพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุขใจ ชูจันทร์. 2555. **สารให้ความหวานพลังงานต่ำ**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

สุภาพร อภิรัตนานุสรณ์. 2554. **การพัฒนาแยมมังคุดแคลอรี่ต่ำผสมเปลือกมังคุด**. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษร์ธานี

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน: มาตรฐานผลิตภัณฑ์แยม (มผช.342/2547)**. กรุงเทพฯ.

สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตรมหาวิทยาลัยแม่โจ้. 2552. **การปลูกเสาวรส**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://portal.rae.mju.ac.th/dbplant/index.php/horticulture/category/passion. (15 พฤศจิกายน 2560).

อัจฉรา ดลวิทยาคุณ. 2556. **การทดลองอาหาร**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ.

A.O.A.C. 2000. Official Methods of Analysis of the Association of Official Chemists International. 17th ed. **The Association of Official Analytical Chemists**. Maryland, U.S.A.

Dobreva, V., M. Hadjikinova, A. Slavov, D. Hadjikinov, G. Dobrev and B. Zhekova. 2013. Functional properties of maltitol. **Agricultural Science and Technology** 5: 168-172.

Kerdsup, P. and P. Naknean. 2013. Effect of sorbitol substitution on physical, chemical and sensory properties of low-sugar mango jam. **Science and Engineering Symposium 4 th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference 2012.** 12-18.

Arabinoxylans Preparation from Commercially Defatted Rice Bran with Two Different Extraction Methods

Passara Nakpong[1], Ladda Sangduean Wattanasiritham[2] and Pinthip Rumpagaporn[1*]

ABSTRACT

Arabinoxylans (AXs), a non-starch polysaccharide found in various cereal brans, has potential as a source of soluble dietary fiber. Also this hemicellulose can be used to improve the qualities of bread dough and to form edible film. Normally, an alkaline solution is needed to extract AXs from plant cell wall. In this study, alkaline-extractable arabinoxylans (AE-AX) was prepared by adding a delignification process and hydrogen peroxide during alkaline extraction. This was done after the removal of starch and protein from commercially defatted rice bran using enzymes. AE-AX extracted by two different extraction methods: A) delignification combined with alkaline and B) delignification combined with alkaline-hydrogen peroxide were compared. Salt was generated during the neutralization step. After dialysis to remove salt, AE-AX extraction yields from both methods were calculated and showed no significant difference. AE-AX obtaining from method B was lighter in color (in a 5% solution) and higher in water solubility than those obtained from method A. HPAEC-PAD results indicated that both AE-AX samples were enriched in xylose (203.44-213.52 mg/g) and arabinose (218.40-221.36 mg/g) whereas galactose and glucose contents were low (33.49-38.99 mg/g and 10.24-11.75 mg/g, respectively). Thus, the delignification combined with alkaline-hydrogen peroxide method can extract AX from destarched, deproteinized and defatted rice bran with high water solubility and light color.

Key Words: arabinoxylans, defatted rice bran, alkaline, alkaline-hydrogen peroxide, delignification

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

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

[2]Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Rice bran is a by-product of rice milling company, being low economic value due to its usage as a low-cost animal feed ingredient. Rice bran dietary fiber (100 g) consisted of 76.7 g of total dietary fiber, which was 1.5 g of soluble dietary fiber and 75.2 g of Insoluble dietary fiber. Additionally, the composition of rice bran insoluble dietary fiber was cellulose, hemicelluloses and lignin (Wen and et al., 2017). Arabinoxylans (AXs), a group of non-starch polysaccharide, is mainly produced from by-products of agricultural cereal grains such as wheat, barley, rye, rice, maize and oat. AXs is cell wall polysaccharides consisting of a backbone of β-1,4 linked D-xylopyranosyl chains, with branches consisting of mainly L-arabinofuranosyl, including smaller quantities of D-galactose and D-glucose. An unusual feature of the structure of AXs is presence of ferulic acids that may be ester-linked to the arabinoxylans structure at some of the α-L-arabinofuranosyl units (Mendis and Simsek, 2014). Most of AXs is not dissolved in water because these heterogeneous polysaccharides form hydrogen bonds with cellulose, and are linked to lignin by covalent ether linkages, however it can be removed by alkaline and alkaline-hydrogen peroxide (Qiu et al., 2017). Bataillon et al. (1998) reported that delignification with sodium chlorite and further extraction with sodium hydroxide produced the highest yield of AXs from destarched wheat bran. In addition hydrogen peroxide improved the delignification process by removing bound lignin which produced extracted AXs from wheat straw with lighter color, compared to samples without addition of hydrogen peroxide (Fang et al., 1999).

Benefits of AXs have been studied such as the improvement of bread dough and bread's qualities (Buksa et al., 2016; Cyran et al., 2014). More recently, AXs has been reported to possess various biological activities such as serum cholesterol reduction, blood sugar level modification, immunity enhancement, attenuation of type II diabetes, enhanced absorption of certain minerals, fecal bulking effect and prebiotics effect (Mendis and Simsek, 2014). Therefore, the objective of this work was to compare the yield, color and monosaccharide composition of alkaline-extractable arabinoxylans (AE-AX) extracted from the commercially defatted rice bran by two different extraction methods. The delignification combined with alkaline and the delignification combined with alkaline-hydrogen peroxide were used for extraction.

MATERIALS AND METHODS

Materials

1. Commercially defatted rice bran was obtained from Thai Edible Oil Co., Ltd.

2. Enzymes Termamyl 120L (120 KNU-T/g), Alcalase 2.4L FG (2.4 AU-A/g) and Amyloglucosidase 300L (300 AGU/ml) from Novozymes were kindly supported by Brenntag Ingredients (Thailand) Public Co., Ltd.

Methods

1. Preparation of destarched and deproteinized rice bran

The commercially defatted rice bran (DFRB) 100 g were added in 1,500 ml of distilled water and pH was adjusted to 7. To remove starch, 400 µl of Termamyl 120L was added and stirred at 100 °C for 1 h t
added and incubated at 60 °C for 1 h,
Amyloglucosidase 300L and incubating at 60 °C for 1h. The enzymes' activities were inactivated by boiling at 100 °C for 15 min (Abdul-Hamid and Luan, 2000). The destarched and deproteinized rice bran (DSPRB) was dried at 60 °C for 8 to 10 h.

2. Extraction of AXs

2.1 Delignification combined with alkaline extraction (Method A)

Twenty grams of DSPRB was mixed with 300 ml of distilled water, then 1.44 ml of 72% H_2SO_4 and 8 g of $NaClO_2$ were added and stirred at 70 °C for 2 h. T
water and the sample was suspended in 400 ml of 0.5 M NaOH and stirred for 6 h at 40 °C, the suspension was recovered by centrifugation at 5000xg for 30 min and the pH of supernatant was adjusted to 4.5 by adding 60% of sulfuric acid. The supernatant was kept for 8 to 10 h to precipitate the hemicelluloses A which were discarded by centrifugation. Four volumes of 95% ethanol were added to the supernatant, stirred for 30 min and kept overnight to precipitate AXs. After filtration through glass filter No.2, AXs was obtained, washed with ethanol and freeze-dried (Bataillon et al., 1998). AXs was dialysed (3.5 kDa cut-off membrane) for 48 h to remove salt and then freeze-dried.

2.2 Delignification combined with alkaline-hydrogen peroxide extraction (Method B)

AXs were obtained by using the same method as mentioned above with one more step of adding 30% of H_2O_2 in 0.5 M NaOH during stirring for 6 h at 40 °C. (Doner and Hicks, 1997)

3. Properties of AXs

3.1 Monosaccharides determination

AXs was hydrolyzed with 5 M H_2SO_4 for 2 h at 100 °C and pH was adjusted to 7-9 with 10 M NaOH. The final volume of AXs samples were adjusted to 25 ml and all the samples were filtered using 0.45 µm nylon membrane filter (Rantanen et al., 2007). The HPAEC-PAD system was used with analytical CarboPac PA-20 column connected to PA-20 guard column. The gradients were consisted

of 10 mM NaOH (eluent A) and 200 mM NaOH (eluent B) with total analysis time of 18 min. A mixture of arabinose, galactose, glucose and xylose were used as external standards.

3.2 Solubility

The water solubility of AXs was determined according to the method of Daou and Zhang (2012). AXs was dissolved in distilled water (1:10 w/v). After stirring for 1 h at room temperature, the supernatant was collected by centrifugation (1500rpm, 10 min), freeze-dried and weighted.

Solubility (%) = [weight (g) of supernatant after freeze drying/weight (g) of sample] x 100

3.3 Color

The color of AXs solution was determined by Hunter Lab Mini Scan XE in triplicate using D_{65} and 10 °observer as an illuminant. L*, a* and b* values were recorded.

4. Proximate analysis

Moisture (method 14:004), protein (method 18:84) and ash (method 14:006) were determined (AOAC, 2000) Total starch content was analysed with Total Starch Assay Kit (Megazyme Amyloglucosidase/alpha-Amylase Method).

5. Experimental design and statistical analysis

Completely randomized designs (CRD) were used for all experiments. All statistical analyses were performed using SPSS software (IBM Corp., USA). Significant differences between samples were evaluated using Tukey's comparison test ($p \leq 0.05$). All data were reported as means ± standard deviations.

RESULTS AND DISCUSSION

Composition of rice bran and AXs

DFRB contained 22.54% of protein and 26.50% of starch (Table 1). After starch and protein were removed by enzymes, the protein content of DSPRB was 13.79%, resulting from the hydrolysis of peptide bond by alcalase enzyme (Hamada, 1999). Starch content of DSPRB was quite low (0.71%) because alpha-amylase can cleave the 1,4 glycosidic bond between glucose units of both amylose and amylopectin randomly to produce maltose and oligomers, whereas amyloglucosidase can break those molecules down to glucose (Gupta et al., 2003). However, the protein contents of AXs were decreased to 1.07-1.39% because protein was dissolved in alkaline during extraction process and might be precipitated at pH 4.5 which is the isoelectric point of rice bran protein during the step of hemicelluloses A precipitation (Fabian et al., 2010).

Table 1 Composition of DFRB, DSPRB and AXs from different extraction methods.

Composition	Moisture (%)	Total starch (%db)	Protein (%db)	Ash (%db)
DFRB	5.87±0.30^{A}	26.50±0.76^{B}	22.54±0.80^{B}	-
DSPRB	11.68±0.04^{B}	0.71±0.15^{A}	13.79±0.30^{A}	-
AXs Method A	3.86±0.08^{a}	0.48±0.26^{a}	1.39±0.15^{a}	76.98±0.19^{a}
AXs Method B	4.16±0.07^{b}	0.42±0.10^{a}	1.07±0.05^{a}	76.19±0.41^{a}

$^{A-B}$ Means within the same column between DFRB and DSPRB with different capital letters are significantly different ($p \leq 0.05$). $^{a-b}$ Means within the same column between method A and method B with different lowercase letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

Extraction of AXs

Large amount of ash (76.19-76.98%) was found in AXs obtained from both extraction methods. This might be due to the salt formation during pH adjustment for precipitation of hemicelluloses A. After dialysis to obtain purified AXs, the yield of AXs was calculated based on the amount of DSPRB and found that the AXs yields of method A (13.37%) and method B (13.95%) were not significantly different. Batailon et al. (1998) studied the extraction and purification of AXs from destarched wheat bran using delignification combined with alkaline method, the yields of AXs were 16 and 13% of destarched wheat bran at lab scale and pilot scale, respectively. The treatment with acidified sodium chlorite could remove surface lignin as found in rice straw (Kahar, 2013) and alkaline disrupted the hydrogen and covalent bonds to loosen up the cell wall matrix and hence solubilised part of hemicelluloses material (Harmsen et al., 2010). Hydrogen peroxide is a common oxidising agent used for dissolution of lignin due to its high reactivity with the aromatic ring (Harmsen et al., 2010). Zhou et al. (2010) indicated that extraction of AXs with 0.15 M of sodium hydroxide combined with 0.5% of hydrogen peroxide at lab scale produced the AXs with 18.5% yield. However, the result in this study showed that the combination of delignification with sodium chlorite and hydrogen peroxide could not improve the yield of AXs significantly.

Monosaccharide determination

The arabinose, galactose, glucose and xylose were the four types of monosaccharide found in both AXs samples containing arabinose 218.40-221.36 mg/g AXs and xylose 203.44-213.52 mg/g AXs as two major monosaccharide. The amounts of galactose and glucose of both AXs samples were quite low, being 33.49-38.99 mg/g AXs and 10.24-11.75 mg/g AXs, respectively (Table 2). Monosaccharide composition of AXs found in other cereal brans was dissimilar. Bender et al. (2017) reported that monosaccharide content found in AXs extracted from rye bran with 0.17 M NaOH at 3 different temperatures (30, 50 and 70°C) was high in glucose (20.45, 32.21 and 23.79 g/100g AXs),

followed by xylose (18.17, 23.46 and 22.56 g/100g AXs), arabinose (10.36, 12.52 and 12.52 g/100g AXs), and galactose (5.11, 4.37 and 2.68 g/100g AXs).

Table 2 Monosaccharide composition of AXs (mg/g) at different extraction methods.

Monosaccharides	Method A	Method B
Arabinose	221.36±5.15[a]	218.40±0.88[a]
Galactose	38.99±0.12[b]	33.49±0.69[a]
Glucose	11.75±3.54[a]	10.24±1.18[a]
Xylose	213.52±4.13[a]	203.44±2.70[a]

[a-b] Means within the same row with different lowercase letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

Solubility of AXs

The water solubility of AXs from method B (87.67%) was significantly higher than that of method A (83.80%). The results was agreed with Locharoenrat (2016) who also reported the solubility of AXs from defatted rice bran was 87.28% and Michniewicz et al. (1990) who found that the water solubility of AXs extracted from wheat flour with 0.4 and 0.6 M of sodium hydroxide were ranged from 50-70% and 60-75%, respectively. The solubility of AXs in aqueous solutions is closely related to the presence of the arabinose substituents along the xylan backbone (Andrewartha et al., 1979).

Color of AXs

AXs from method B showed the higher lightness value and lower yellowness (b* value) than that from method A. Generally, the presence of bound lignin was associated to the pigmentation of extracted hemicelluloses (Fang et al., 1999). Therefore, our results indicated that delignification with sodium chlorite could not remove all lignin and addition of hydrogen peroxide could improve the delignification process and caused lighter in color due to presence of bleaching agents.

Table 3 Solubility and color of AXs solution prepared by different extraction methods.

	Solubility	Color		
		L*	a*	b*
Method A	83.80±0.84[a]	82.53±0.06[a]	2.68±0.08[b]	16.99±0.20[b]
Method B	87.67±0.74[b]	92.02±0.24[b]	0.67±0.03[a]	8.31±0.01[a]

[a-b] Means within the same column with different lowercase letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

CONCLUSION

The delignification combined with alkaline-hydrogen peroxide extraction method produced the AE-AX with the lighter color and higher water solubility, compared to the delignification combined with alkaline extraction method. However, the yield of AXs extracted with these two methods was not significantly different. Therefore, AE-AX obtained from the delignification combined with alkaline-hydrogen peroxide extraction method is recommended for fortifying soluble fiber in food and beverages and in liquid foods, can be highly concentrated.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Thailand Research Fund (TRG5780288) for financial support.

REFERENCES

Abdul-Hamid, A. and Y.S. Luan. 2000. Functional properties of dietary fibre prepared from defatted rice bran. **Food Chemistry**. 68: 15-19.

Andrewartha, K.A., D.R. Phillips and B.A. Stone. 1979. Solution properties of wheat-flour arabinoxylans and enzymatically modified arabinoxylans. **Carbohydrate Research**. 77: 191-204.

AOAC. 2000. **Official methods of analysis of AOAC**, 17th ed. Arlington, Va, USA.

Bataillon, M., P. Mathaly., A.-P. Nunes Cardinali. and F. Duchiron. 1998. Extraction and purification of arabinoxylans from destarched wheat bran in a pilot scale. **Industrial Crops and Products**. 8: 37- 43.

Bender, D., M. Schmatz, S. Novalin, R. Nemeth, F. Chrysanthopoulou, S. Tomoskozi, K. Torok, R. Schoenlecher and S. D'Amico. 2017. Chemical and rheological characterization of arabinoxylan isolates from rye bran. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**. 4: 1-8.

Buksa, K., A. Nowotna and R. Ziobro. 2016. Application of cross-linked and hydrolyzed arabinoxylans in baking of model rye bread. **Food Chemistry**. 192: 991-996.

Cyran, M. R. and W. M. Dynkowska. 2014. Model of endosperm and wholemeal arabinoxylans solubilisation during rye breadmaking: Genotypic diversity in the level, substitution degree and marcromolecular characteristics. **Food Chemistry**. 145: 356-364.

Daou, C. and H. Zhang. 2012. Study on functional properties of physically modified dietary fibres derived from defatted rice bran. **Journal of Agricultural Science**. 4: 85-97.

Doner, L.W. and K.B. Hicks. 1997. Isolation of Hemicellulose from corn fiber by alkaline hydrogen peroxide extraction. **Cereal Chemistry**. 74: 176-181.

Fabian, C.B., L.H. Huynh and Y.H. Ju. 2010. Precipitation of rice bran protein using carrageenan and alginate. **LWT-Food Science and Technology**. 43: 375-379.

Fang, J. M., R.C. Sun, D. Salisbury, P. Fowler and J. Tomkinson. 1999. Comparative study of hemicelluloses from wheat straw by alkali and hydrogen peroxide extractions. **Polymer Degradation and Stability**. 66: 423-432.

Gupta, R., P. Gigras, H. Mohapta, V.K. Goswami and B. Chauhan. 2003. Microbial **α**-amylase: a biotechnological perspective. **Process Biochemistry**. 38: 1599-1616.

Hamada, J.S. 1999. Use of proteases to enhance solubilization of rice bran solubilization of rice bran proteins. **Journal of Food Biochemistry**. 23: 307–321.

Harmsen, P.F.H., W.J.J. Huijgen, L.M. Bermudez Lopez and R.R.C. Bakker. 2010. Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass. Wageningen UR Food & Biobased Research.

Kahar, P. 2013. Synergistic effects of pretreatment process on enzymatic digestion of rice straw for efficient ethanol fermentation. Pp. 65-87. *In* M. Petre., eds. **Environmental Biotechnology-New Approaches and Prospective Application**. INTECH, Croatia.

Locharoenrat, S. 2016. **Preparation of arabinoxylans extract from commercially defatted rice bran by using alkali solution and its applications in emulsion system**. M.S. Thesis, Kasetsart University.

Mendis, M. and S. Simsek. 2014. Arabinoxylan and human health. **Food Hydrocolloids**. 43: 239-243.

Michniewicz, J., C.G. Biliadenis and W. Bushuk. 1990. Water-insoluble pentosans of wheat: composition and some physical properties. **Cereal Chem**. 67: 434-439.

Qiu, S., M.P. Yadav. and L. Yin. 2017. Characterization and functionalities study of hemicelluloses and cellulose components isolated from sorghum bran, bagasse and biomass. **Food Chemistry**. 230: 225-233.

Rantanen, H., L. Virkki, P. Tuomainen, M. Kabel, H. Schols and M. Tenkanen. 2007. Preparation of arabinoxylobiose from rye xylan using family 10 Aspergillus aculeatus endo-1,4-**β**-D-xylanase. **Carbohydrate Polymers**. 68: 350-359.

Wen, Y., M. Niu, B. Zhang, S. Zhao and S. Xiong. 2017. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymetic and enzyme-micronization treatments. **LWT-Food Science and Technology**. 75: 344-351.

Zhou, S., X. Liu, Y. Guo, Q. wang, D. Peng and L. Cao. 2010. Comparison of the immunological activities of arabinoxylans from wheat bran with alkali and xylanase-aided extraction. **Carbohydrate Polymers**. 81: 784-789.

การเปรียบเทียบผลการย้อมผ้าฝ้ายด้วยครามและห้อม

Comparison of Dyeing Result on Cotton Fabric between *Indigofera Tinctoria Linn* and *Baphicacanthus Cusia Brem*

เกศศินี นามกร[1] และ ขนิษฐา วัชราภรณ์[1*]

Katsinee Nammakorn[1] and Kanitta Watcharaporn[1*]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อการเปรียบเทียบผลการย้อมผ้าฝ้ายด้วยครามและห้อม โดยการวัดค่าสีด้วยระบบ L* a* b* และ ค่าความเข้มของสี (K/S) การวัดค่าสีทำโดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีวัดค่าการสะท้อนแสง เริ่มจากย้อมผ้าฝ้ายด้วยครามและห้อมโดยใช้ความเข้มข้น 10, 50, 80 และ 100 กรัมต่อลิตร โดยใช้อัตราส่วน เนื้อคราม: โซเดียมไดไธโอไนท์ เท่ากับ 2 : 1 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 2 กรัมต่อลิตร พบว่าห้อมจะให้เฉดสีที่เข้มมากกว่าครามอย่างเห็นได้ชัด ผลการวิจัยแสดงเมื่อความเข้มข้นของครามและห้อมเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 100 กรัมต่อลิตร เส้นกราฟแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเข้มของสีของผ้าย้อมห้อมเพิ่มขึ้นสูงกว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มสีของบนผ้าย้อมคราม ส่วนการระบุเฉดสีพบว่า ทั้งครามและห้อมมีค่า K/S สูงสุดที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร จากผลการทดลองระบุได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบครามเปียกและห้อมเปียกที่น้ำหนักเท่ากัน ผลการย้อมด้วยสูตรการย้อมข้างต้น ผ้าฝ้ายย้อมห้อมติดสีเข้มกว่าผ้าฝ้ายย้อมครามอย่างเห็นได้ชัด

ABSTRACT

The objective of this research was to compare the dyeing results on cotton fabric between *Indigofera Tinctoria Linn* (Kram) and *Baphicacanthus Cusia Brem* (Hom), using color measurement to obtained L* a* b* value and color strength (K/S). The color measurement was done by Reflectance Spectroscopy technique. Cotton fabrics were dyed with the concentration of 10, 50, 80 and 100 g/l of Kram and Hom, with the weight ratio of Kram (or Hom) to Sodium dithionite as 2:1 and 2 g/l of Sodium hydroxide. It was found that the color strength of Hom dyeing is higher than Kram dyeing significantly. The results showed that when dye concentration increased from 10 to 100 g/l, color strength line of Hom fabric increased faster than Kram's color strength line. To identified hue or color, both Kram and Hom showed maximum value of K/S at wavelength of 650 nm. The results showed that starting with the same weight of Kram and Hom, Hom's dyed cotton showed darker color than Kram's dyed cotton.

Key Words: kram, hom, indigo, K/S, L*, a*, b* color

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

[1]ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ต้นคราม มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Indigofera Tinctoria Linn* พบมากในบริเวณที่ราบสูง ในประเทศไทยตามภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดที่ปลูกต้นครามและย้อมครามมากที่สุด คือจังหวัดสกลนคร มีต้นกำเนิดมากจากชาวผู้ไทชาวเขาในพื้นที่ (องค์กรสวนพฤกษศาสตร์, 2560; สุดารัตน์ สกุลคูและคณะ, 2557) โดยพบได้จากหลักฐานตามวัฒนธรรมการแต่งกาย และมีการสืบทอดการย้อมผ้าครามจากบรรพบุรุษ ซึ่งผ้าที่ได้จากการย้อมครามแต่ละผืนมีคุณค่าและเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว ถือเป็นการใช้ศาสตร์และศิลป์เพื่อให้ได้ผ้าแต่ละผืนจากการสืบทอดภูมิปัญญาต่างๆจากบรรพบุรุษ รวมทั้งต้องอาศัยความชำนาญในการเพื่อให้เกิดสีที่สวยงาม

ต้นห้อม หรือ ต้นฮ่อม มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Baphicacanthus Cusia Brem* พบที่บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย โดยพบมากที่จังหวัดแพร่ ยังถือเป็นจังหวัดที่ผลิตสีห้อมและผ้าหม้อห้อมหรือผ้าม่อฮ่อม ซึ่งเป็นเสื้อสำหรับผู้ชายชาวล้านนาสมัยก่อน ซึ่งสันนิษฐานว่าได้รับอิทธิพลมาจากพวกลาวพวนสมัยหลังสงครามโลกครั้งที่2 (องค์กรสวนพฤกษศาสตร์, 2560; สไว มัฐผา, 2558) เกิดการสืบทอดการย้อมหม้อห้อมมาจนถึงปัจจุบัน ผ้าที่ย้อมด้วยห้อมจะได้เป็นสีน้ำเงินเข้ม นิยมนำไปย้อมเสื้อผ้าหลากหลายรูปแบบมากขึ้น รวมทั้งผ้าพันคอ ผ้านุ่งหรือผ้าถุงต่างๆ เนื่องจากความต้องการสูงขึ้น จากสีที่เป็นเอกลักษณ์ต่างจากสีสังเคราะห์ทั่วไป

พืชทั้งสองชนิดเป็นพืชให้สีน้ำเงินที่เรียกว่าสีคราม (indigo blue) ที่นิยมนำมาย้อมผ้าฝ้ายซึ่งสืบทอดกันมายาวนาน ขั้นตอนการย้อมมีหลักการคล้ายกัน กล่าวคือ มีการนำคราม หรือห้อมเปียกไปละลายในน้ำด่าง หลังจากนั้นจะเติมสารรีดิวซ์เพื่อให้ครามหรือห้อมเกิดรีดักชั่นเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีเหลือง ซึ่งเป็นลักษณะของการย้อมสีวัต การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นดังแสดงใน Figure 1 (Valentina Buscio, 2014)

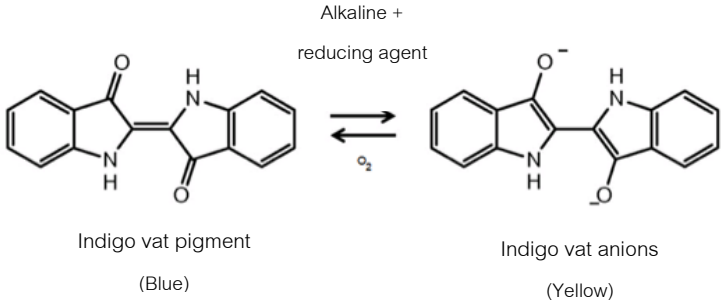


Figure 1 Reaction of change indigo blue to indigo white. (Valentina Buscio, 2014)

ที่ผ่านมามีงานวิจัยศึกษาและพัฒนาการย้อมสีจากครามและห้อมที่หลากหลาย (ศันสนีย์ แวนประเสริฐ. 2552; ศูนย์ครามสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร, 2559) หากยังไม่มีการนำผลการย้อมของครามและห้อมมาเปรียบเทียบกันโดยใช้หลักทางวิทยาศาสตร์ของสีมาอธิบายให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน งานวิจัยนี้จึงนำวิธีวัดค่าสีมาใช้โดยเทคนิคสเปกโตรสโคปี (Spectroscopy) เพื่อวัดค่าสีในระบบ L* a* b* และ วัดค่าสะท้อนแสง (Reflectance; R) ณ จุดต่ำที่สุด โดยนำค่า R ดังกล่าว มาคำนวณเป็นค่าความเข้มของสี (Color Strength; K/S) ดังแสดงในสมการที่1 (J.R. Aspland, 1997)

$$K/S = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad \text{..... eq. 1}$$

โดยที่ K/S คือ ค่าความเข้มสี (Color Strength) และ R คือ ค่าการสะท้อนแสง (Reflectance)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความแตกต่างของผลของการย้อมสีผ้าฝ้ายจากครามและห้อม โดยในปฏิกิริยาการย้อมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่าง และ โซเดียมไดไทโอไนท์ ($Na_2S_2O_4$) เป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) เพื่อศึกษาความแตกต่างของเฉดสีโดยวัดค่าสีจาก L* a* b* และ ความแตกต่างของความเข้มของสีจากครามและ ห้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ผ้าที่ใช้ในการทดลองเป็นผ้าฝ้าย 100 เปอร์เซ็นต์ มีโครงสร้างเป็นผ้าถัก ผ่านการทำความสะอาดแล้ว ในการทดลองย้อมจะใช้ผ้าทดลองน้ำหนัก 5 กรัม ทั้งนี้จะใช้ผ้าทดลองทั้งสิ้น 24 ชิ้น สำหรับการทดลองย้อม 8 วิธี จำนวน 3 ซ้ำ
2. ด่างที่ใช้ในการทดลอง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ในอัตราส่วน 2 กรัมต่อลิตร
3. สารรีดิวซ์ที่ใช้ในการทดลอง คือ โซเดียมไดไธโอไนท์ ($Na_2S_2O_4$) โดยใช้อัตราส่วน เนื้อคราม: โซเดียมไดไธโอไนท์ เท่ากับ 2 : 1
4. ครามเปียกจาก อ.ภูพาน จ.สกลนคร และห้อมเปียก จาก อ.นาคูหา จ.แพร่
5. เครื่อง pH meter รุ่น STARTER3100 ยี่ห้อ OHAUS จาก ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่อง Spectrophotometer รุ่น COLOR-EYE 7000 ยี่ห้อ Macbeth จาก ประเทศสหรัฐอเมริกา

การย้อมผ้าฝ้ายด้วยครามและห้อม

เตรียมน้ำย้อมที่ความเข้มข้นต่างๆ 4 ความเข้มข้นได้แก่ 10, 50, 80, และ 100 กรัมต่อลิตร โดยปริมาณสารที่ใช้แสดงใน Table 1 นำครามหรือห้อมเปียกผสมกับน้ำ คนให้เป็นเนื้อเดียวกัน เติม NaOH คนให้ละลายแล้วจึงเติม $Na_2S_2O_4$ คนให้ละลายและทิ้งไว้ 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง จะเห็นน้ำย้อมเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีเหลือง จึงนำผ้าที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วมาจุ่มลงในน้ำย้อม และ ขย้ำด้วยมือเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นบีบน้ำออกและนำมาผึ่งให้โดนอากาศ ให้สีย้อมเกิดการออกซิไดซ์กับออกซิเจนในอากาศเป็นเวลา 20 นาที จึงนำไปซักด้วยน้ำเปล่าจนกระทั่งน้ำซักผ้าใสไม่มีสีหลุดออกมาจากผ้าอีก

Table 1 Amount of dyes and other chemicals in dyebaths

Concentration (g/l)	10	50	80	100
Kram or Hom (g)	1.5	7.5	12	15
NaOH (g)	0.3	0.3	0.3	0.3
$Na_2S_2O_4$ (g)	0.75	3.75	6	7.5
H_2O (ml)	150	150	150	150

การวัดสี

วัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer (รุ่น COLOR-EYE 7000 ยี่ห้อ Macbeth จาก ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยใช้ illuminant D65 และ 10°receiver ในการวัดค่าสี L*, a*, b* และ ค่าความเข้มสีซึ่งแสดงในรูปของ K/S คำนวณได้จากสมการของ Kubelka-Munk ดังแสดงในสมการที่ 1

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวัดค่าสี L* a* b* และ ค่าความเข้มของสี (K/S)

จากการทดลองย้อมผ้าฝ้ายด้วยครามและห้อมด้วยความเข้มข้นต่างๆ 4 ความเข้มข้นได้แก่ 10, 50, 80, และ 100 กรัมต่อลิตร ผลการย้อมแสดงใน Table 2 และ 3

Table 2 Color measurement of cotton fabric dyed with 4 concentration of Kram

Kram (g/l)	Dyed fabric	L*	a*	b*	K/S
10		63.08	-2.73	-12.63	3.45
50		37.55	-3.09	-17.01	4.33
80		37.1	-3.3	-17.14	8.93
100		35.16	-3.35	-17.12	10.01

L* = the lightness of a color. Here L*=0 represents absolute black, L*=100 represents perfect white.

a* = The positive a*-axis represents the red shade of a color, the negative a*-axis represents the green shade.

b* = The positive b*-axis is for the color yellow, negative b*-values mean blue.

K/S = Color Strength of the dyed fabric.

Table 3 Color measurement of cotton fabric dyed with 4 concentration of Hom

Hom (g/l)	Dyed fabric	L*	a*	b*	K/S
10		53.88	-2.87	-17.79	10.24
50		28.09	-1.94	-19.09	15.26
80		25.32	-1.06	-19.12	20.11
100		23.69	-0.86	-21.79	21.74

L* = the lightness of a color. Here L*=0 represents absolute black, L*=100 represents perfect white.

a* = The positive a*-axis represents the red shade of a color, the negative a*-axis represents the green shade.

b* = The positive b*-axis is for the color yellow, negative b*-values mean blue.

K/S = Color Strength of the dyed fabric.

จาก Table 2 พบว่าผ้าที่ได้จาการย้อมครามมีสีเข้มขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ค่า L* ของผ้าที่ย้อมด้วยปริมาณเนื้อครามต่างกัน มีค่าแตกต่างกัน เล็กน้อยและไม่สูงมากอยู่ระหว่าง 35.5 37.5-ที่ความเข้มข้น 50, 80 และ 100 กรัมต่อลิตร แสดงว่าสีผ้ามีความสว่างไม่สูง แต่ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ผ้ามีค่า L* หรือมีค่าความสว่างสูงและ มีค่าที่แตกต่างออกไปที่ 63.08 และแสดงว่าค่าความสว่างลดลงเมื่อความเข้มข้นครามเพิ่มขึ้น ค่า a* อยู่ในแกนของความเป็นสีแดง เขียว-ผลการย้อมผ้าด้วยครามพบว่ามีค่า a* เป็นค่าลบและมีค่าต่างกัน

เล็กน้อย อยู่ในช่วง (-)2.73 ถึง (-)3.35 แสดงว่าผ้าที่ย้อมด้วยครามที่มีความเข้มข้นต่างกันมีความเป็นสีเขียวใกล้เคียงกัน ค่า b* อยู่ในแกนของความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน ผลการย้อมผ้าด้วยครามพบว่ามีค่า b* เป็นลบและมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของครามเพิ่มขึ้น แสดงว่าผ้าย้อมครามมีความเป็นสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของครามเพิ่มขึ้น เมื่อมาเปรียบเทียบกับผลค่าความเข้มสี K/S ผ้าที่ย้อมครามมีค่าความเข้มของสีสูงสุดที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ซึ่งระบุถึงเฉดสีน้ำเงิน และ ค่า K/S ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อค่าความเข้มข้นของครามเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า K/S เรียงจากความเข้มข้นน้อยไปมากได้ดังนี้ 3.45, 4.33, 8.93 และ 1จะเห็นได้ว่าการ0.01 ระบุค่าสีด้วย K/S จะเห็นค่าสีที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับอย่างชัดเจนกว่าการวัดสีด้วยระบบ L* a* b*

จาก Table3 จะเห็นว่าจะเห็นว่าผ้าที่ได้จากการย้อมห้อมมีสีเข้มกว่าผ้าที่ได้จาการย้อมครามอย่างเห็นได้ชัด ค่า L* ของผ้าที่ย้อมด้วยปริมาณเนื้อห้อมต่างกัน มีค่าแตกต่างกัน เล็กน้อยและไม่สูงมากอยู่ระหว่าง 23.69 - 28.09ที่ความเข้มข้น 50, 80 และ 100 กรัมต่อลิตร แต่ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ผ้ามีค่า L* ที่แตกต่างออกไปที่ 53.88 ซึ่งมีแนวโน้มในความแตกต่างของค่า L* เหมือนกับผลการย้อมของคราม หากแต่ค่า L* ของห้อมมีค่าต่ำกว่าของคราม ค่า a* เป็นลบและต่างกันเล็กน้อย อยู่ในช่วง (-)0.86 ถึง (-)2.87 แสดงว่าผ้าที่ย้อมด้วยห้อมที่มีความเข้มข้นต่างกันให้ความเป็นสีเขียวใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบค่า a* ของผ้าย้อมครามแล้ว พบว่าค่า a* อยู่ในช่วงใกล้เคียงกันคือ มีปริมาณของสีเขียวใกล้เคียงกันและมีความเป็นสีเขียวไม่มาก ค่า b* เป็นลบและมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของห้อมเพิ่มขึ้น แสดงว่าผ้าที่ย้อมด้วยห้อมให้สีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า b* ของผ้าที่ย้อมครามดังแสดงใน Figure 2a) ผ้าที่ย้อมห้อมจะให้ค่า b* ที่สูงกว่าผ้าที่ย้อมครามมาก ผลการวัดสีแสดงว่าผ้าที่ย้อมห้อม 10 กรัมต่อลิตร ให้ค่า b* ที่สูงกว่าผ้าที่ย้อมครามที่ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร เมื่อมาเปรียบเทียบกับผลค่าความเข้มสี K/S พบว่าค่าความเข้มของสีสูงสุดที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร เหมือนกับคราม ค่า K/S ของผ้าย้อมห้อม สูงกว่าค่าของผ้าย้อมครามอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงใน Figure 2b ผลการทดลองแสดงให้เห็นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มของสีของผ้าที่ย้อมห้อมมีอัตราการเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่และมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นสูงกว่าผ้าย้อมคราม ซึ่งสังเกตได้จากความชันของเส้นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มของสีใน Figure 2b

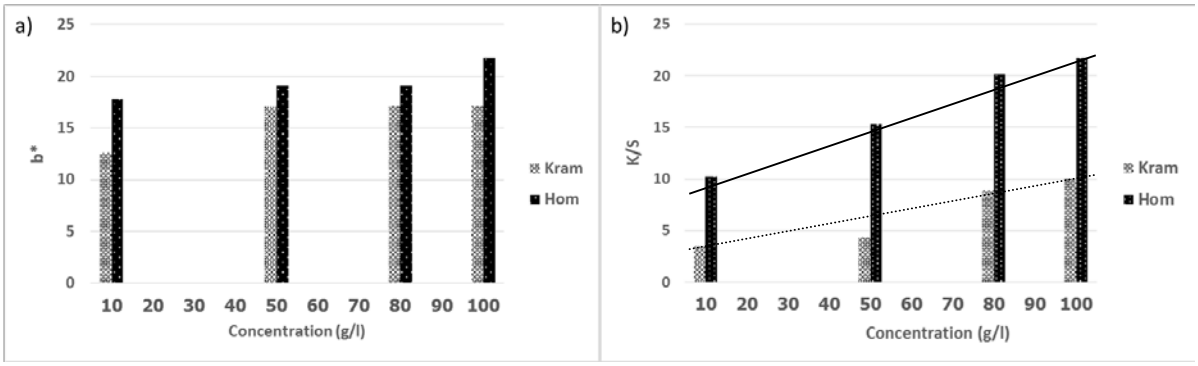


Figure 2 Dyeing result of cotton fabric dyed with Kram and Hom

a) Comparison of b* value

b) Comparison of K/S value

สรุป

ความแตกต่างของผลการย้อมครามและห้อมที่ความเข้มข้นเท่ากัน ห้อมจะให้เฉดสีที่เข้มมากกว่าครามอย่างเห็นได้ชัด และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มของสีของผ้าย้อมห้อมมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นสูงกว่าของผ้าย้อมคราม ส่วนการระบุเฉดสีพบว่า สีของผ้าที่ย้อมจากครามและห้อมมีค่า K/S สูงสุดที่ความยาวคลื่นเดียวกัน ผลการทดลองแสดงว่าสูตรการย้อมนี้เมื่อใช้ปริมาณห้อมเปียกที่น้ำหนักเท่ากับครามนั้นให้ผลการย้อมผ้าฝ้ายได้สีที่เข้มกว่า จึงสรุปว่าสูตรการย้อมนี้เหมาะสำหรับการย้อมผ้าฝ้ายด้วยห้อมมากกว่าคราม

จากงานวิจัยนี้ผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเตรียมการย้อมห้อมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมห้อมให้เกิดการดูดซับสีย้อมให้เข้าสู่เนื้อผ้าได้มากขึ้นและศึกษาเพื่อลดอัตราการเหลือทั้งสารเคมีและสีย้อมที่ค้างอยู่ในน้ำย้อมซึ่งจะทำให้การควบคุมเฉดสีเป็นไปได้ยาก

เอกสารอ้างอิง

ศันสนีย์ แวนประเสริฐ .2552 .**สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย้อมไหมด้วยครามธรรมชาติ** .วิทยานิพนธ์สาขาคหกรรมศาสาตร์ มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นิรนาม 2559 .**คู่มือที่ 19 การผลิตผ้า ย้อมคราม** .ศูนย์ครามสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร, สกลนคร

นิรนาม. 2560. **ฐานข้อมูลพันธุ์ไม้**. แหล่งที่มา: http://www.qsbg.org/database/botanic_book%20full%20option/search_detail.asp?botanic_id=2331. สืบค้นเมื่อ 30 กรกฎคม 2560

สไว มัฐผา .2558 .**พืชสกุลครามในประเทศไทย**. ศูนย์วิจัยอนุกรมวิธานประยุกต์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สุดารัตน์ สกุลคูและคณะ 2557 .**องค์ความรู้ ผ้าย้อมคราม**. แหล่งที่มา: http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/.20141241332551pdf. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎคม 2 560

Aspland, J.R, 1997 **Textile Dyeing and Coloration**, American Association of Textile Chemicals and Colorists, 1997.

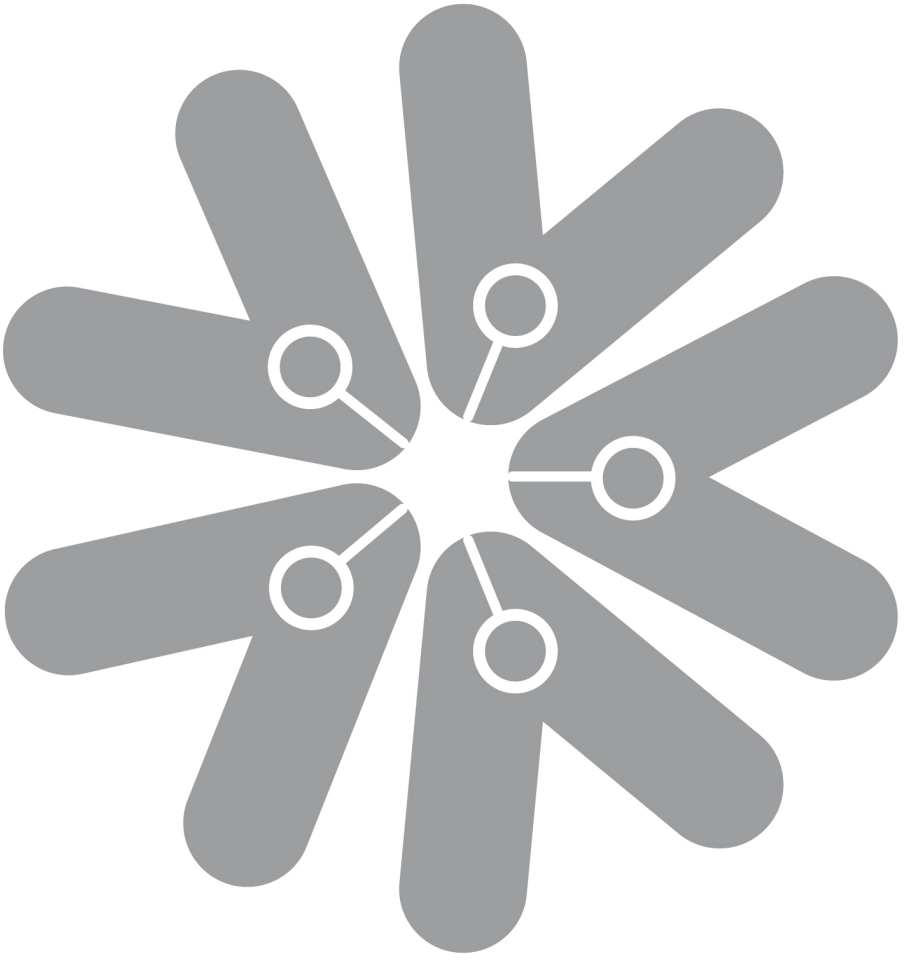
V. Buscio, V., Crespi, M. and Gutiérrez-Bouzán. C. 2014, A Critical Comparison of Methods for the Analysis of Indigo in Dyeing Liquors and Effluents, **Materials**, *7*(9), 6184-6193

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Subject: Natural Resources and Environment

ภาคบรรยาย

Oral Presentation



Enhanced Cellulolytic Enzyme System of the Multienzyme Complex from *Cellulosibacter alkalithermophilus* by Combination with Cellobiohydrolase and β-Glucosidase

Sirilak Baramee[1] and Khanok Ratanakhanokchai[2*]

ABSTRACT

The alkalitolerant thermophilic xylanolytic–cellulolytic multienzyme complex from *Cellulosibacter alkalithermophilus* (CaMEC) completely hydrolyses xylan to xylose however its cellulolytic enzyme system is incomplete, showing major endocellulase activity, leading to a low glucose yield. To enhance their cellulolytic enzyme system and glucose yield, we searched for the synergistic collaboration of this complex enzyme with other cellulolytic enzymes, cellobiohydrolase PcCel6A from *Paenibacillus curdlanolyticus* B-6 and β-glucosidase CglT from *Thermoanaerobacter brockii*. The result showed that combination of CaMEC with PcCel6A and CglT at ratio 1:4:1 was most suitable for cellulose degradation and glucose production. The addition of PcCel6A and CglT increased 6.80-fold of glucose concentration, in comparison with CaMEC alone. Moreover, all hydrolysable cellulose was transformed to glucose, indicating the complete cellulose degradation by these enzymes. These results suggest that CaMEC, in combination with PcCel6A and CglT, can be a potential candidate for degrading cellulose to glucose and will be a suitable enzyme cocktail for application to biorefinery process.

Key words: Cellobiohydrolase, *Cellulosibacter alkalithermophilus*, β-glucosidase, Multienzyme complex, Synergism

*Corresponding author; e-mail address: **khanok.rat@kmutt.ac.th**

[1]Pilot Plant Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10150, Thailand

[2]School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10150, Thailand

INTRODUCTION

Recently, lignocellulosic biomass is expected to be utilized as a starting material for many biorefinery processes due to its polysaccharide composition, cellulose and hemicellulose (Sun and Cheng, 2002). However, the recalcitrant structure of lignocellulose restricts its efficient utilization. The complete enzymatic degradation of polysaccharides in lignocellulose requires the synergistic actions of several cellulolytic-xylanolytic enzymes. Many anaerobic bacteria are known to produce multiple cellulases and xylanases as large extracellular multienzyme complex (MEC), known as cellulosome (Bayer *et al*., 2004) or xylanosome (Jiang *et al*., 2005). These MECs contain binding ability to bacterial cells and insoluble substrates via carbohydrate binding modules, resulting in high activity against recalcitrant insoluble substrate (Bayer *et al*., 2004).

Cellulosibacter alkalithermophilus is a newly isolated alkalithermophile in the Enzyme Technology Laboratory, King Mongkut's University of Technology Thonburi. This strain produces the alkalitolerant thermophilic xylanolytic–cellulolytic multienzyme complex which showed effective hydrolysis of xylan, cellulose, and untreated lignocellulosic biomass (Baramee *et al*., 2015). Investigation of hydrolysis product showed complete conversion of birchwood xylan to xylose, which can be further fermented by many microbial strains to produce xylitol, ethanol, or other products. However, CaMEC hydrolysed cellulose to a series of cellooligosaccharides, glucose to cellotetraose (G_1–G_4), which was not suitable for further utilization. The accumulations of the series of cellooligosaccharides indicate the deficient cellobiohydrolase and β-glucosidase activities of CaMEC (Baramee *et al*., 2015). In this study, to enhance the cellulolytic ability of CaMEC and glucose yield, the synergism of CaMEC with cellobiohydrolase PcCel6A from *Paenibacillus curdlanolyticus* B-6 and β-glucosidase CglT from *Thermoanaerobacter brockii* on hydrolysis of crystalline cellulose was determined. These investigations showed that PcCel6A and CglT are a good combination to enhance the cellulolytic ability of the CaMEC, suggesting they would be suitable enzyme cocktail for biomass degradation and conversion in biorefinery industry.

MATERIALS AND METHODS

1. Preparation of the crude multienzyme complexes CaMEC

C. alkalithermophilus was grown anaerobically at 55 °C to late exponential phase in basal medium with the pH adjusted to 9.5, and cellulose powder (0.3% w/v; Sigma cell type 20) was used as the sole carbon source. The culture supernatant was collected by centrifugation, and then concentrated using a tangential flow ultrafiltration device with an Omega 10-kDa-cut off membrane (Pall Life Sciences, USA) and used as crude enzyme.

2. Preparation of the cellobiohydrolase PcCel6A and β-glucosidase CglT

The cellobiohydrolase PcCel6A from *P. curdlanolyticus* B-6 and β-glucosidase CglT from *T. brockii* was prepared from *E. coli* BL21 (DE3) containing the pET28PcCel6A and pET19CglT plasmids, respectively (Baramee *et al*., 2017; Waeonukul *et al*., 2012). *E. coli* BL21 (DE3) harbouring pET28PcCel6A and pET19CglT were grown on LB medium supplemented with kanamycin (30 μg/ml) or ampicillin (100 μg/ml). The culture was incubated at 37 °C and 200 rpm until OD600 of the culture reached 0.6-0.8. Protein expression was induced at 16 °C by addition of isopropyl β-D-1-thiogalactopyranoside at a final concentration of 1 mM. After 18 h of incubation, cells were harvested and disrupted by sonication. Cell-free extracts were purified with HisTrap™ FF columns (GE healthcare, Little Chalfont, UK).

3. Protein determination and enzyme assays of CaMEC, PcCel6A, and CglT

All experiments were conducted in triplicate. Protein concentrations were determined by the Lowry method (Lowry *et al*., 1951) using bovine serum albumin as a standard. All enzyme activities were determined in 0.1 M sodium phosphate buffer, pH 7.0 and incubated at 60 °C for 10 min. For CaMEC, 1% (w/v) of birchwood xylan and CMC were used as substrates for xylanase and CMCase activities, respectively. One unit (U) of enzyme activity was defined as the amount of enzyme producing 1 μmol of reducing sugar per minute under the assay conditions. For PcCel6A and CglT, enzyme activities were determined using 1 mM of cellotetraose and *p*-nitrophenyl-β-D-glucopyranoside as substrates, respectively. One unit of cellobiohydrolase or β-glucosidase activities were defined as the amount of enzyme required to release 1 μmol of cellobiose or *p*-nitrophenol per minute under the assay conditions, respectively.

4. Assessment of CaMEC synergy in combination with PcCel6A and CglT

All synergistic assays were determined using 5 g/L cellulose powder in 0.1 M sodium phosphate buffer, pH 7.0 and incubated at 60 °C for 10 min. The CaMEC (0.2 U/ml of CMCase) were supplemented with various amounts of PcCel6A (0-1 U/ml cellobiohydrolase activity), resulting in enzyme activity ratios of CaMEC to PcCel6A ranging from 1:0 to 1:5. After 5-hour incubation, the reducing sugar concentration was measured. The CaMEC and PcCel6A combination (at the optimum ratio for synergistic hydrolysis) was then supplemented with various amounts of CglT (0-1 U/ml β-glucosidase activity), resulting in enzyme activity ratios of the three enzyme combination ranging from 1:4:0 to 1:4:5. After 5-hour incubation, the reducing sugar and glucose concentration were determined. The degree of synergism was defined as the ratio of the combined enzyme activity to the sum of the individual enzyme activity. Then, the time courses of the synergistic effects of CaMEC with PcCel6A and CglT were examined at the optimum ratio for synergistic hydrolysis of these enzymes combination. Aliquots withdrawn at various time intervals were assayed for glucose concentration.

5. Analysis of hydrolysis products

Hydrolysis samples were centrifuged at 10,000 for 1 min to collect the supernatants. The release of reducing sugars was determined by the Somogyi–Nelson method (Nelson, 1944) using xylose, glucose, or cellobiose as the standard. Glucose and cellobiose concentration was quantified by HPLC with a RID-10A reflective index detector (Shimadzu, Japan) using cellooligosaccharides (G_1–G_6) as the standards. The samples were separated on Aminex HPX-42C column (Bio-Rad, USA) using MilliQ-filtered water (EMD Millipore, USA) as a mobile phase at a flow rate of 0.6 mL/min and 85 ^{o}C. The hydrolysis products profile were analysed by TLC as described by Sornyotha *et al*. (2007). The following equation was used to calculate the percent conversion of cellulose to glucose:

$$\% \text{ conversion} = \frac{\text{mg of glucose (162/180)}}{\text{mg of cellulose (dry weight)}} \times 100$$

where the factor 162/180 is the conversion factor for dehydration on polymerization of cellulose to equivalent glucose.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Assessment of CaMEC synergy in combination with PcCel6A and CglT

The extracellular multienzyme complex CaMEC from *C. alkalithermophilus* has the potential biomass-degrading capacity, releasing the major hydrolysis product, xylose, and the series of cellooligosaccharides (G_1–G_4) (Baramee *et al*., 2015). This result indicates the apparently complete xylanolytic enzyme system, while incomplete cellulolytic enzyme system of CaMEC, which deficient cellobiohydrolase and β-glucosidase activities. Our previous results showed that cellobiohydrolase PcCel6A and β-glucosidase CglT promoted the cellulose hydrolysis of the cellotetraohydrolase Cel9R (Baramee *et al*., 2017). We expected that PcCel6A would also disrupt some tight cellulose structures and use the hydrolysis product from CaMEC as a substrate, and then CglT will further hydrolysed cellotriose and cellobiose to glucose. Therefore, the synergism between CaMEC with recombinant cellulolytic enzymes, PcCel6A and CglT were studied and cellulose powder, high purity crystalline celluloses, was selected to use instead of crystalline cellulose in plant biomass.

Synergistic effects in the degradation of cellulose powder were examined using a combination of CaMEC supplemented with PcCel6A (for the enzyme activity ratios of 1:0 to 1:5). After incubation, the reducing sugar concentrations significantly increased when the concentration of PcCel6A was increased, in comparison with CaMEC alone. The synergistic ratio was 1.47 at the enzyme activity ratio of 1:4 and then slightly increased to the highest value (approximately 1.49 times of the sum of the individual activities) at the enzyme activity ratio of 1:5 (Figure 1). The combination of CaMEC and PcCel6A released 10.4 mg/L of glucose after 5 h of incubation (Figure 2). In order to

increase the glucose production, the CaMEC and PcCel6A combination system (at enzyme activity ratio of 1:4) was supplemented by the β-glucosidase CglT (for the enzyme activity ratios of 1:4:0 to 1:4:5). As shown in Figure 2, the addition of CglT significantly increased glucose concentration, 5.54- and 5.96-fold at an enzyme activity ratio of 1:4:1 and 1:4:5, respectively. Although the highest synergistic effect was observed at an enzyme activity ratio of 1:4:5, considering the glucose yield and enzyme loading, the enzyme activity ratio of 1:4:1 was selected for further synergism.

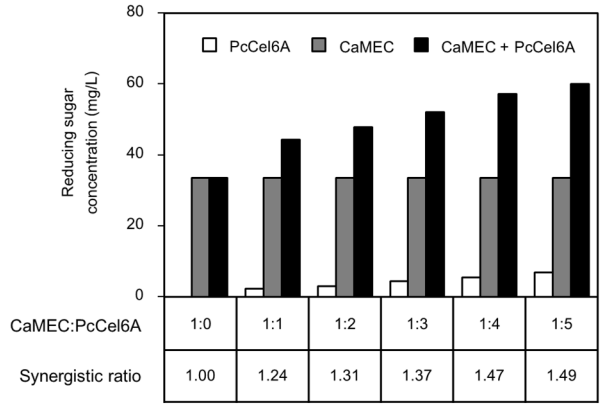


Figure 1 Reducing sugar concentration and degree of synergistic effect of CaMEC combined with PcCel6A on cellulose degradation.

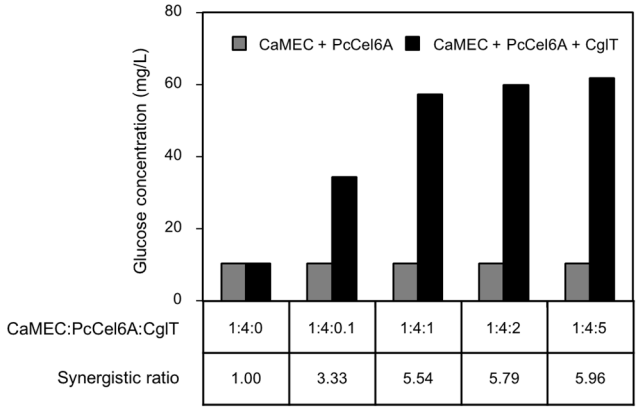


Figure 2 Glucose concentration and degree of synergistic effect of two enzymes combination (CaMEC + PcCel6A) and three enzymes combination (CaMEC + PcCel6A + CglT).

2. Glucose production by combination of CaMEC, PcCel6A and CglT

The previous parts showed that the addition of PcCel6A and CglT can enhance the cellulolytic enzyme activity of the CaMEC. In order to increase glucose concentration, the enzyme loading was increased 5 times with the same condition to that of Figure 2. As shown in Figure 3, the glucose concentrations significantly increased when supplemented with CglT, compared with CaMEC alone (6.80-fold increased) and CaMEC plus PcCel6A combination (4.86-fold increased). For three

enzymes combination, glucose increased dramatically to 0.23 g/L at 30 min and then slightly increased to 0.34 g/L at 5 h of hydrolysis. Both hydrolysis rates are related to the initial catalysis of the more amorphous region of the cellulosic substrates (Mansfield and Meder 2003). After 18 h of incubation, the cellulose conversion to glucose by three-enzyme combination reached 8.12% (data not shown). The percent conversion indicated that crystalline region is the obstacle for these enzymes action and more substrate pretreatment is needed to get a higher yield of glucose.

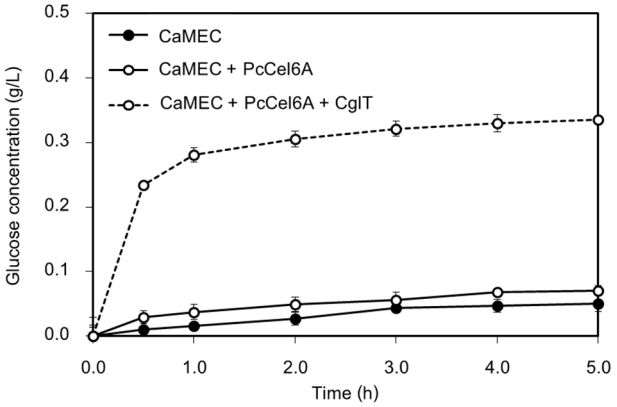


Figure 3 Time course of glucose production from cellulose powder by CaMEC alone, two enzymes combinations (CaMEC + PcCel6A), and three enzymes combination (CaMEC + PcCel6A + CglT).

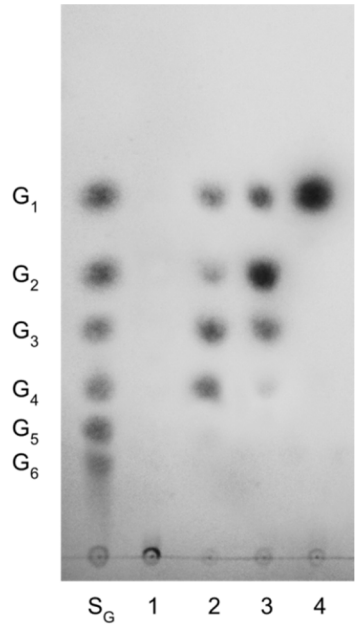


Figure 4 Thin layer chromatography of the products released from cellulose powder hydrolysed by the combination of CaMEC, PcCel6A, and CglT. Lane 1, substrate blank; lanes 2, 3, and 4, hydrolysis products using CaMEC alone, two enzymes combination (CaMEC + PcCel6A), and three enzymes combination (CaMEC + PcCel6A + CglT), respectively; lane S_G, standard series of cellooligosaccharides (G_1-G_6).

The hydrolysis products in the final reaction (18 h incubation) of CaMEC alone, two enzymes combination (CaMEC and PcCel6A), and three enzymes combination (CaMEC, PcCel6A, and CglT) were analyzed by TLC (Figure 4). It was observed that the CaMEC and PcCel6A combination yielded cellobiose as the major product. The concentration of glucose was slightly higher when compared with the hydrolysis products of CaMEC alone (Figure 4, lane 2), whereas nearly all cellotetraose was hydrolysed (Figure 4, lane 3). It has previously been reported that cellobiohydrolase is the key cellulase enzymes in cellulose hydrolysis (Teeri, 1997). This TLC result supported the data shown in Figure 1, which indicated that PcCel6A played a very important role in cellulose degradation and acted synergistically with CaMEC to produce soluble cellooligosaccharides. In case of three enzymes combination, only glucose was found as a hydrolysis product (Figure 4, lane 4), indicating complete cooperative actions between endoglucanase, cellobiohydrolase, and β-glucosidase activities. This was clear evidence that CaMEC required both cellobiohydrolase and β-glucosidase activities for highest glucose production. PcCel6A could facilitate endoglucanase activity of CaMEC and increase the cellobiose and cellotriose which was further hydrolysed by CglT. Taken together, these results suggest that this enzyme combination has great potential as a cellulolytic system to produce glucose from crystalline cellulose and can be applied to biodegradation of raw plant biomass to monosaccharides, xylose and glucose, for renewable energy and chemicals industries.

CONCLUSION

In this study, the extracellular multienzyme complex CaMEC was supplemented with cellobiohydrolase PcCel6A and β-glucosidase CglT on cellulose degradation. The results showed a significant enhancement of cellulolytic enzyme activity when compared to the unsupplemented reaction. Moreover, all hydrolysable cellulose was transformed to glucose, indicating the good collaboration between these enzymes. Overall results suggested that the CaMEC combination can be applied to bioconversion of cellulose and lignocellulosic biomass to simple sugars for biorefinery industries.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the financial support provided by King Mongkut's University of Technology Thonburi through the "KMUTT 55th Anniversary Commemorative Fund". First author gratefully acknowledges support provided by the King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) through a post-doctoral fellowship.

REFERENCES

Baramee, S., P. Phitsuwan, R. Waeonukul, P. Pason, C. Tachaapaikoon, A. Kosugi and K. Ratanakhanokchai. 2015. Alkaline xylanolytic–cellulolytic multienzyme complex from the novel anaerobic alkalithermophilic bacterium *Cellulosibacter alkalithermophilus* and its hydrolysis of insoluble polysaccharides under neutral and alkaline conditions. **Process Biochemistry** 50: 643–650.

Baramee, S., T. Teeravivattanakit, P. Phitsuwan, R. Waeonukul, P. Pason, C. Tachaapaikoon, A. Kosugi, K. Sakka and K. Ratanakhanokchai. 2017. A novel GH6 cellobiohydrolase from *Paenibacillus curdlanolyticus* B-6 and its synergistic action on cellulose degradation. **Applied Microbiology and Biotechnology** 101: 1175–1188.

Bayer, E.A., J.P. Belaich, Y. Shoham and R. Lame. 2004. The cellulosomes: multienzyme machines for degradation of plant cell wall polysaccharides. **Annual Review of Microbiology** 58: 521–554.

Jiang, Z.Q., W. Deng, X.T. Li, Z.L. Ai, L.T. Li and I. Kusakabe. 2005. Characterization of a novel, ultra-large xylanolytic complex (xylanosome) from *Streptomyces olivaceoviridis* E-86. **Enzyme and Microbial Technology** 36: 923–929.

Lowry, O.H., N.J. Rosebrough, A.L. Farr and R.J. Randall. 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. **Journal of Biological Chemistry** 193: 265–275.

Mansfield, S.D. and R. Meder. 2003. Cellulose hydrolysis–the role of monocomponent cellulases in crystalline cellulose degradation. **Cellulose** 10: 159–169.

Nelson, N. 1944. A photometric adaptation of the Somogyi method for the determination of glucose. **Journal of Biological Chemistry** 153: 375–380.

Sornyotha, S., K.L. Kyu and K. Ratanakhanokchai. 2007. Purification and detection of linamarin from cassava root cortex by high performance liquid chromatography. **Food Chemistry** 104: 1750–1754.

Sun, Y. and J. Cheng. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource Technology** 83: 1–11.

Teeri, T. T. 1997. Crystalline cellulose degradation: new insight into the function of cellobiohydrolases. **Trends in Biotechnology** 15: 160–167.

Waeonukul, R., A. Kosugi, C. Tachaapaikoon, P. Pason, K. Ratanakhanokchai, P. Prawitwong, L. Deng, M. Saito and Y. Mori. 2012. Efficient saccharification of ammonia soaked rice straw by combination of *Clostridium thermocellum* cellulosome and *Thermoanaerobacter brockii* beta-glucosidase. **Bioresource Technology** 107: 352–357.

การจำแนกความขัดแย้งทางนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ

Classification of Recreation Conflicts in National Park Areas

ศุภกร ประทุมถิ่น[1*] และ นภวรรณ ฐานะกาญจน์ พงษ์เขียว[1]

Suphakon Prathumthin[1*] and Noppawan Tanakanjana Phongkhieo[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกรูปแบบของความขัดแย้งทางนันทนาการในอุทยานแห่งชาติในประเทศไทยโดยภาพรวม และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความขัดแย้งทางนันทนาการ เก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามกับหัวหน้าอุทยานแห่งชาติ หรือตัวแทนผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ จำนวน 107 แห่ง วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนาและการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม พบว่าอุทยานแห่งชาติร้อยละ 48.60 ไม่มีความขัดแย้งด้านนันทนาการในพื้นที่ รองลงมาร้อยละ 30.80 มีความขัดแย้งทางนันทนาการในรูปแบบที่ 1 คือ การประกอบกิจกรรมนันทนาการประเภทเดียวกันโดยใช้พื้นที่ร่วมกันหรือใกล้เคียงกัน แต่ผู้ประกอบกิจกรรมมีความคาดหวังประสบการณ์นันทนาการที่แตกต่างกัน ในส่วนของปัจจัยที่ส่งผลต่อความขัดแย้งทางนันทนาการ พบว่าประกอบด้วย1) พื้นที่นันทนาการไม่เพียงพอ 2) พฤติกรรมของนักท่องเที่ยวต่างกลุ่มไม่เหมาะสม 3) นักท่องเที่ยวเลือกประกอบกิจกรรมที่หลากหลายขึ้น 4) ภูมิหลังของนักท่องเที่ยวมีความหลากหลาย และ 5) มีการประกอบกิจกรรมนันทนาการที่หลากหลายในพื้นที่เดียวกัน

ABSTRACT

The objectives of this research were to classify recreation conflict patterns in national parks and to study factors affecting the conflicts. Questionnaire was conduct in park superintendent or officer in national park survey and 107 national parks completed the questionnaire. Data analyzed by descriptive statistics and discriminant analysis. The results of this study revealed that 48.60% of the national parks had no recreation conflict while 30.80% had type 1 of recreation conflict or the situation that visitors with different desired experiences engaged in same recreation activity in same area. Factors affecting recreation conflicts included 1) Inadequacy of recreation area to accommodate visitors 2) Inappropriate behaviors of other visitor groups 3) Visitors choose more diverse recreation activities 4) Diverse background of visitors and 5) Many recreation activities taking place in same area.

Key Words: recreation conflicts, national parks, superintendents' perception

*Corresponding author; e-mail address: narupholp@hotmail.com

[1]สาขาวิชาอุทยาน นันทนาการ และการท่องเที่ยว ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Parks, Recreation, and Tourism Program, Department of Conservation, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ความขัดแย้งทางนันทนาการถือเป็นส่วนหนึ่งของปรากฏการณ์ความขัดแย้งที่พบเห็นได้ในสังคมทุกระดับ ซึ่ง Morris (2004) ได้ให้ความเห็นว่าความขัดแย้งเป็นเรื่องที่ยากจะหลีกเลี่ยงได้ เมื่อมนุษย์มีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับความขัดแย้งทางนันทนาการเริ่มขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของการแก่งแย่งแข่งขันกันในการประกอบกิจกรรมนันทนาการในพื้นที่ธรรมชาติ เช่น การตั้งแคมป์ การเดินป่าชมธรรมชาติ และกิจกรรมนันทนาการทางน้ำ (Hammitt and Schneider, 2000) ซึ่งความขัดแย้งดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อบุคคล หรือกลุ่มบุคคลต่างกลุ่มใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติในแหล่งเดียวกัน ด้วยจุดมุ่งหมายที่แตกต่างกัน และถูกรบกวนสิ่งที่ตนคาดหวัง โดยการศึกษาของ Jacob and Schreyer (1980) ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความขัดแย้งทางนันทนาการ จนนำมาซึ่งการจำแนกรูปแบบของการเกิดความขัดแย้งทางนันทนาการขึ้น ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นการศึกษาด้านความขัดแย้งทางนันทนาการอย่างจริงจัง เพื่อการจัดการความขัดแย้งให้ลดลง ปรากฏให้เห็นทั้งเชิงทฤษฎี (Jacob and Schreyer, 1980; Schneider and Hammitt, 1995) และเชิงประจักษ์ที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความขัดแย้งทางนันทนาการในเชิงกิจกรรมและพื้นที่ประกอบกิจกรรมนันทนาการ เช่น การศึกษาความขัดแย้งที่เกิดจากรูปแบบกิจกรรมของนักเดินป่าชมธรรมชาติกับนักปั่นจักรยาน (Watson *et al*., 1991; Hendricks, 1997) นักพายเรือแคนูกับผู้ประกอบนันทนาการโดยเรือยนต์ (Ivy *et al*., 1992) การศึกษาการรับรู้ความขัดแย้งทางนันทนาการ (Blahna *et al*., 1995) การศึกษาพฤติกรรมการยอมรับความขัดแย้งทางนันทนาการ (Johnson and Dawson, 2004) และการศึกษาเพื่อจัดการความขัดแย้งทางนันทนาการ (Hidalgo and Harshaw, 2010; Shilling *et al*., 2012) สำหรับการศึกษาความขัดแย้งทางนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติของประเทศไทยนั้นยังมีอยู่น้อยมาก โดยที่ผ่านมาเป็นเพียงการศึกษาความขัดแย้งในฐานะตัวแปรหนึ่งของงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมผู้มาเยือนพื้นที่อุทยานแห่งชาติ โดยใช้ชื่อตัวแปรที่สะท้อนถึงความขัดแย้งทางนันทนาการในแง่มุมที่แตกต่างกัน เช่น การรับรู้พฤติกรรมของนักท่องเที่ยวกลุ่มอื่น (สุพล, 2546) การรับรู้ความแออัดในพื้นที่อุทยาน ความคาดหวังเกี่ยวกับจำนวนนักท่องเที่ยว ความรู้สึกขัดแย้งระหว่างกิจกรรม (แสงจันทร์, 2548) เป็นต้น ในระหว่างที่อุทยานแห่งชาติมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนนักท่องที่ยว และกิจกรรมนันทนาการที่มีความหลากหลายมากขึ้นบนฐานทรัพยากรธรรมชาติที่จำกัด ซึ่ง Kuss *et al.* (1990) ได้อธิบายถึงปัจจัยหนึ่งเกิดจากความขัดแย้งระหว่างผู้ประกอบกิจกรรมนันทนาการ ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดการย้ายแหล่งประกอบกิจกรรม และการถูกรบกวนทางประสบการณ์ทางนันทนาการ การวิจัยเชิงลึกเกี่ยวกับความขัดแย้งทางนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติในประเทศไทยเป็นการเฉพาะจึงมีความจำเป็น งานวิจัยนี้จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อจำแนกรูปแบบของความขัดแย้งทางนันทนาการในอุทยานแห่งชาติในประเทศไทยโดยภาพรวม และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความขัดแย้งทางนันทนาการในมุมมองของผู้ปฏิบัติหน้าที่ในอุทยานแห่งชาติ เพื่อนำไปสู่การวิจัยต่อยอดเกี่ยวกับความขัดแย้งแต่ละประเภทในเชิงลึก และวิเคราะห์รูปแบบการจัดการความขัดแย้งทางนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติในประเทศไทยต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์หลักในการวิจัยในครั้งนี้คือ แบบสอบถาม ประกอบด้วยข้อมูล 4 ตอน คือ ตอนที่ 1 ข้อมูลเกี่ยวกับอุทยานแห่งชาติ ตอนที่ 2 กิจกรรมนันทนาการที่ปรากฏในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ ตอนที่ 3 ความขัดแย้ง

ทางนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ และตอนที่ 4 ปัจจัยและสถานการณ์ความขัดแย้งทางนันทนาการในปัจจุบัน

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยกำหนดให้อุทยานแห่งชาติทุกแห่งในประเทศไทยเป็นประชากรในการศึกษาซึ่งเป็นการศึกษาในมุมมองของกลุ่มผู้ปฏิบัติหน้าที่ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ ที่สามารถให้ข้อมูลการจำแนกรูปแบบของความขัดแย้งทางนันทนาการอย่างชัดเจนอีกกลุ่มหนึ่ง โดยทำการสำรวจข้อมูลจากทุกหน่วยของประชากร (census survey) โดยการส่งแบบสอบถามทางไปรษณีย์ถึงอุทยานแห่งชาติทั้งหมด 148 แห่งทั่วประเทศ มีการติดตามการตอบแบบสอบถามและส่งแบบสอบถามกลับทางโทรศัพท์เป็นรายพื้นที่ ใช้ระยะเวลาในการรวบรวมข้อมูล 2 เดือน ได้รับการตอบแบบสอบถามกลับจากหัวหน้าอุทยานแห่งชาติ และตัวแทนหัวหน้าอุทยานแห่งชาติที่ปฏิบัติหน้าที่ในพื้นที่ ทั้งสิ้น 107 แห่ง คิดเป็นอัตราการตอบกลับร้อยละ 72.3

สำหรับการสร้างเครื่องมือในการวิจัยครั้งนี้ทำโดยการศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมากำหนดประเด็นสอบถามให้ครอบคลุมเนื้อหาและวัตถุประสงค์การศึกษา มีการตรวจสอบความเป็นปรนัย (objectivity) และความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (content validity) ของข้อคำถามก่อนการส่งแบบสอบถามถึงอุทยานแห่งชาติ ภายหลังที่ได้รับแบบสอบถามกลับมา ผู้วิจัยทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของคำตอบ ลงรหัสข้อมูล (coding) และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา และวิธีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม (discriminant analysis) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการจำแนกรูปแบบความขัดแย้งทางนันทนาการ

ผลและวิจารณ์

ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับอุทยานแห่งชาติ

อุทยานแห่งชาติที่ตอบแบบสอบถามกลับ 107 แห่ง เป็นอุทยานแห่งชาติทางบก จำนวน 88 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 88.20 และอุทยานแห่งชาติทางทะเล 19 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 17.80 ด้านความเข้มข้นของจำนวนนักท่องเที่ยวในอุทยานแห่งชาติต่อปี โดยเฉลี่ยย้อนหลัง 5 ปี (ระหว่างปี 2555 – 2559) ส่วนใหญ่ มีความเข้มข้นของนักท่องเที่ยวต่ำกว่า 25,000 คนต่อปี คิดเป็นร้อยละ 43.90 รองลงมามีความเข้มข้นของนักท่องเที่ยว ระหว่าง 25,001 – 50,000 คนต่อปี คิดเป็นร้อยละ 22.40 และมีความเข้มข้นของนักท่องเที่ยว 50,001 – 100,000 คน คิดเป็นร้อยละ 11.20 โดยภาพรวมจึงอาจสรุปได้ว่านักท่องเที่ยวมีการเข้าใช้ประโยชน์ในอุทยานแห่งชาติกระจายตัวทั่วทุกภูมิภาคในประเทศไทย

กิจกรรมนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ

ในการจำแนกความขัดแย้งทางนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติในครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาความหลากหลายของกิจกรรมนันทนาการที่ปรากฏในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ ผลการศึกษาในส่วนของจำนวนกิจกรรมที่ปรากฏในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ พบว่ามีจำนวนทั้งสิ้น 20 กิจกรรม กิจกรรมที่พบมากที่สุด คือ การตั้งแคมป์พักแรม พบในจำนวน 100 อุทยานแห่งชาติ คิดเป็นร้อยละ 93.50 รองลงมาคือ กิจกรรมชมวิว/ถ่ายภาพ จำนวน 98 อุทยานแห่งชาติ คิดเป็นร้อยละ 91.60 และ กิจกรรมเดินป่า จำนวน 85 อุทยานแห่งชาติ คิดเป็นร้อยละ 90.70 ค่าร้อยละของกิจกรรมนันทนาการที่ปรากฏในอุทยานแห่งชาติเป็นรายกิจกรรมปรากฏตาม Table 1

Table 1 Percentage distribution of recreation activities in national park areas

Activity	Exist	Do not exist
1. Camping	93.50	6.50
2. Viewing scenery/Photographing	91.60	8.40
3. Hiking	90.70	9.30
4. Nature/Plant community study	75.70	24.30
5. Waterfall playing	70.10	29.90
6. Bird watching	69.20	30.80
7. Picnicking	53.30	46.70
8. Biking	48.60	51.40
9. Cave watching	31.80	68.20
10. Butterfly watching	27.10	72.90
11. Beach activities	16.80	83.20
12. Snorkeling	15.90	84.10
13. Canoeing/Kayaking	15.90	84.10
14. Rafting	15.00	85.00
15. Local culture study	14.00	86.00
16. Wildlife watching	10.30	89.70
17. Visiting historical site	10.30	89.70
18. Mineral bathing	8.40	91.60
19. Scuba diving	7.50	92.50
20. Climbing	3.70	96.30

ในส่วนของการลำดับความนิยมในการประกอบกิจกรรมนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ ซึ่งเป็นการตอบแบบสอบถามโดยการเรียงลำดับความนิยมจากกิจกรรมที่ปรากฏในพื้นที่อุทยานแห่งชาติแต่ละแห่ง โดยกลุ่มผู้ปฏิบัติหน้าที่ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ ได้ทำการเรียงลำดับความนิยมของกิจกรรมนันทนาการที่ปรากฏในอุทยานแห่งชาติของตนเอง โดยการระบุความนิยมจากมากที่สุดไปหาน้อยที่สุด สรุปให้เห็นในสามลำดับแรกที่ได้รับความนิยมในพื้นที่อุทยานแห่งชาติในประเทศไทย เพื่อให้เห็นความหลากหลายของการประกอบกิจกรรมนันทนาการ และความนิยมกิจกรรมนันทนาการ พบว่า กิจกรรมที่ได้รับความนิยมเป็นลำดับที่ 1 สูงที่สุด คือ กิจกรรมเล่นน้ำตก จำนวน 36 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 33.60 รองลงมา คือ กิจกรรมถ่ายภาพ/ชมวิว จำนวน 23 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 21.50 และกิจกรรมตั้งแคมป์พักแรม จำนวน 16 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 15.00 กิจกรรมที่ได้รับความนิยมเป็นลำดับที่ 2 ในอุทยานแห่งชาติ สูงที่สุด คือ กิจกรรมตั้งแคมป์พักแรม จำนวน 30 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 28.00 รองลงมา คือ กิจกรรมชมวิว/ถ่ายภาพ จำนวน 20 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 18.70 และกิจกรรมเดินป่า จำนวน 16 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 15.00 กิจกรรมที่ได้รับความนิยมเป็นลำดับที่ 3 สูงที่สุด คือ กิจกรรมเดินป่า จำนวน 24 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 22.40 รองลงมา คือ กิจกรรมชมวิว/ถ่ายภาพ จำนวน 18 แห่ง คิดเป็นร้อยละ

16.80 และกิจกรรมปิกนิก/ทำอาหาร จำนวน 11 แห่ง คิดเป็น 10.30 โดยภาพรวมสรุปได้ว่ากิจกรรมนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติในประเทศไทยมีความหลากหลาย และกิจกรรมที่ได้รับความนิยมเป็นกิจกรรมที่ไม่จำเป็นต้องใช้ทักษะในการประกอบกิจกรรมมากนัก

รูปแบบและลักษณะความขัดแย้งทางนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ

ในการจำแนกความขัดแย้งทางนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติครั้งนี้ พบว่า รูปแบบของความขัดแย้งทางนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติมีทั้งหมด 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 การประกอบกิจกรรมนันทนาการประเภทเดียวกันโดยใช้พื้นที่ร่วมกันหรือใกล้เคียงกัน แต่ผู้ประกอบกิจกรรมมีความคาดหวังประสบการณ์นันทนาการที่แตกต่างกัน รูปแบบที่ 2 การประกอบกิจกรรมนันทนาการต่างประเภทกัน โดยใช้พื้นที่ร่วมกันหรือใกล้เคียงกัน รูปแบบที่ 3 พบความขัดแย้งทางนันทนาการทั้งรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 แต่รูปแบบที่หนึ่งรุนแรงกว่า และรูปแบบที่ 4 พบความขัดแย้งทางนันทนาการทั้งรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 แต่รูปแบบที่สองรุนแรงกว่า ผลการศึกษาพบว่าหัวหน้าอุทยานแห่งชาติส่วนใหญ่ คิดเป็นร้อยละ 48.60 คิดว่าพื้นที่ในความรับผิดชอบของตนเองไม่มีความขัดแย้งด้านนันทนาการ ในส่วนที่ตอบว่ามีความขัดแย้งส่วนใหญ่จำนวน 33 อุทยานแห่งชาติ คิดเป็นร้อยละ 30.80 มีความขัดแย้งรูปแบบที่ 1 รองลงมา คือ รูปแบบที่ 3 จำนวน 13 อุทยานแห่งชาติ คิดเป็นร้อยละ 12.10 รายละเอียดปรากฏใน Table 2

Table 2 Frequency and percentage distribution of recreation conflict patterns in national parks

Patterns of recreation conflict	Frequency	Percentage
1. No recreational conflict	52	48.60
2. 1st pattern of conflict	33	30.80
3. 2nd pattern of conflict	5	4.70
4. Both patterns of conflict, with the 1st pattern of conflict being more severe	13	12.10
5. Both patterns of conflict, with the 2nd pattern of conflict being more severe	4	3.70

ในส่วนของลักษณะความขัดแย้งทางนันทนาการในอุทยานแห่งชาตินั้น พบว่ามีลักษณะความขัดแย้งที่หลากหลาย ภายใต้เงื่อนไขของรูปแบบของความขัดแย้งทางนันทนาการที่กล่าวมาแล้ว ดังนี้ รูปแบบที่ 1 พบว่ากิจกรรมที่มีความขัดแย้งทางนันทนาการมากที่สุด คือ กิจกรรมตั้งแคมป์พักแรม พบใน 35 อุทยานแห่งชาติ คิดเป็นร้อยละ 32.70 รองลงมาคือ กิจกรรมชมธรรมชาติ พบใน 13 อุทยานแห่งชาติ คิดเป็นร้อยละ 12.10 ซึ่งเป็นรูปแบบการประกอบกิจกรรมประเภทเดียวกันแต่ความคาดหวังประสบการณ์นันทนาการของผู้ประกอบกิจกรรมแตกต่างกัน กล่าวคือ กลุ่มที่ต้องการความสงบ ซึมซับธรรมชาติ ขัดแย้งกับกลุ่มที่ต้องการความรื่นเริง ส่งเสียงดังรบกวน รูปแบบที่ 2 พบว่าปรากฏคู่ของกิจกรรมนันทนาการที่มีความขัดแย้งค่อนข้างหลากหลาย โดยในอุทยานแห่งชาติบางแห่งปรากฏลักษณะความขัดแย้งทางนันทนาการในรูปแบบนี้มากกว่า 1 คู่ขึ้นไป เช่น กิจกรรมปั่นจักรยาน กับ เดินป่าศึกษาธรรมชาติ กิจกรรมเล่นน้ำตก กับ ดูนก กิจกรรมดูนก กับ ตั้งแคมป์พักแรม กิจกรรมส่อง

สัตว์ กับ ปั่นจักรยาน กิจกรรมตั้งแคมป์พักแรม กับ ดูผีเสื้อ กิจกรรมดูผีเสื้อ กับ การขับขี่ยานพาหนะ/จักรยาน กิจกรรมดูผีเสื้อ กับ กิจกรรมเล่นน้ำตก กิจกรรมดูนก กับ ปั่นจักรยาน กิจกรรมพายเรือ กับ ดำน้ำตื้น/ว่ายน้ำ เป็นต้น

ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการจำแนกรูปแบบความขัดแย้งทางนันทนาการในอุทยานแห่งชาติ โดยยุบรวมรูปแบบของความขัดแย้งทางนันทนาการตามที่ระบุใน Table 2 จาก 5 กลุ่มเหลือ 3 กลุ่ม คือ 1) ไม่มีความขัดแย้ง 2) มีความขัดแย้งรูปแบบที่ 1 และความขัดแย้งผสมที่รูปแบบที่ 1 เด่น และ 3) มีความขัดแย้งรูปแบบที่ 2 และความขัดแย้งผสมที่รูปแบบที่ 2 เด่น ใช้ตัวแปรอิสระที่คาดว่าจะเป็นสาเหตุของความขัดแย้งตามการรับรู้ของหัวหน้าอุทยานแห่งชาติจำนวน 10 ตัว พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการจำแนกรูปแบบความขัดแย้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติมี 5 ปัจจัย เรียงลำดับตามขนาดอิทธิพลที่พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การจำแนกมาตรฐาน (Standardized Canonical Discriminant Function Coefficients) ดังนี้คือ 1) พื้นที่นันทนาการไม่เพียงพอ 2) พฤติกรรมของนักท่องเที่ยวต่างกลุ่มไม่เหมาะสม 3) นักท่องเที่ยวเลือกประกอบกิจกรรมที่หลากหลายขึ้น 4) ภูมิหลังของนักท่องเที่ยวมีความหลากหลาย และ 5) มีการประกอบกิจกรรมนันทนาการที่หลากหลายในพื้นที่เดียวกัน ดังรายละเอียดใน Table 3 ซึ่งผลการศึกษาในส่วนนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Watson *et al.* (1991) ที่พบว่ากิจกรรมที่หลากหลายแตกต่างกันในพื้นที่ประกอบกิจกรรมนันทนาการเดียวกันส่งผลให้เกิดความขัดแย้งทางนันทนาการ

Table 3 Results from discriminant analysis revealing the influence of each independent variable in classifying recreation conflict pattern in national parks

Independent variable	Wilks' Lambda	F	p-value	Standardized Canonical Discriminant Function Coefficient
1. Inadequacy of recreation area to accommodate visitors	.876	6.342	.003	.649
2. Inappropriate behaviors of other visitor groups	.899	5.028	.009	.530
3. Visitors choose more diverse recreation activities	.913	4.292	.017	.526
4. Diverse background of visitors	.916	4.115	.019	.494
5. Many recreation activities taking place in same area	.934	3.168	.047	.460

Remarks: Eigenvalue = .333; % of Variance = 76.2; Canonical Correlation = .500
Percentage of correctly classification: Group 0 (no conflict) = 55.0%; Group 1 (conflict type 1 and type 1 dominantly) = 70.5%; Group 2 (conflict type 2 and type 2 dominantly) = 22.2%; Overall percentage of correctly classification = 59.1%

สรุป

ผลการวิจัยโดยภาพรวมสรุปได้ว่าความขัดแย้งด้านนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นความขัดแย้งในลักษณะของการประกอบกิจกรรมนันทนาการประเภทเดียวกันโดยใช้พื้นที่ร่วมกันหรือใกล้เคียงกัน แต่ผู้ประกอบกิจกรรมมีความคาดหวังประสบการณ์นันทนาการที่แตกต่างกัน ส่วนปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดความขัดแย้งด้านนันทนาการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติตามการรับรู้ของหัวหน้าอุทยานแห่งชาติเป็นปัจจัยเชิงสถานการณ์เกี่ยวกับความไม่เพียงพอของพื้นที่ประกอบกิจกรรม การที่ผู้ประกอบกิจกรรมบางส่วนมีพฤติกรรมที่ไม่เหมาะสม และการที่กิจกรรมหลาย ๆ กิจกรรมเกิดขึ้นในพื้นที่เดียวกัน ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการจัดการพื้นที่และผู้ใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม เช่น การแบ่งแยกเขตพื้นที่ประกอบกิจกรรมตามความแตกต่างของประสบการณ์นันทนาการที่ปรารถนา อาทิ การแบ่งเขตพื้นที่การตั้งแคมป์แยกกันระหว่างผู้ประกอบกิจกรรมนันทนาการที่มีเป้าหมายเพื่อผักผ่อนชื่มชับความสงบในพื้นที่ธรรมชาติ กับกลุ่มที่เป้าหมายสร้างความรื่นเริงภายในกลุ่มตนเอง การบังคับใช้กฎระเบียบในพื้นที่ประกอบกิจกรรมอย่างจริงจัง อาทิ การส่งเสียงดังรบกวนสัตว์ป่า และผู้ประกอบกิจกรรมนันทนาการกลุ่มอื่น การห้ามนำเครื่องดื่มแอลกอออล์เข้าในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ เป็นต้น ส่วนปัจจัยที่เป็นลักษณะพื้นฐานของตัวผู้ประกอบกิจกรรมนันทนาการ เช่น ภูมิหลังและความต้องการในกิจกรรมนันทนาการที่หลากหลาย อาจตอบสนองได้ในระดับหนึ่งเช่นกัน ถ้ามีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของผู้มาเยือนในเชิงลึก เพื่อนำข้อมูลมาประกอบการพัฒนากิจกรรมที่สอดคล้องกับความต้องการ ซึ่งข้อค้นพบจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบงานวิจัยเกี่ยวกับความขัดแย้งทางนันทนาการในอุทยานแห่งชาติในประเทศไทยในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหัวหน้าอุทยานแห่งชาติทุกแห่งที่สนับสนุนข้อมูลวิจัย และมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

สุพล จิตร์วิจัษณ์. 2546. **การวิเคราะห์พฤติกรรม และปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของนักท่องเที่ยวที่ประกอบกิจกรรมดูนก : กรณีศึกษา อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

แสงจันทร์ วายทุกข์. 2548. **การรับรู้ของนักท่องเที่ยวต่อความแออัดในแหล่งนันทนาการทางธรรมชาติ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Blahna, D., K. Smith and J. Anderson. 1995. Backcountry Llama Packing: Visit Perceptions of Acceptability and Conflict. **Leisure Sciences** 17: 185 – 204.

Hammitt, W.E. and I.E. Schneider. 2000. Recreation Conflict Management, pp. 347 – 356. *In* W.C. Gartner and D.W. Lime., eds. **Trends in Outdoor Recreation, Leisure and Tourism**. CABI Publishing, New York.

Hendrick, W. 1997. Mountain Bike Management and Research: An Introduction. **Trends** 34 (3): 2 – 4.

Hidalgo, A.E.R. and H. Harshaw. 2010. Managing Outdoor Recreation Conflict on the Squamish, Columbia Trial Network, pp. 134 – 140. *In* **Proceeding of the 2010 Northeastern Recreation Research Symposium**. British Columbia.

Ivy, M.I., W.P. Stewart and C.C. Lue. 1992. Exploring the Role of Tolerance in Recreational Conflict. **Leisure Research** 24 (4): 348 – 360.

Jacob, G.R. and R. Schreyer. 1980. Conflict in Outdoor Recreation: A Theoretical Perspective. **Leisure Research** 12 (4): 368 – 380.

Johnson, A. and C. Dawson. 2004. An Exploratory Study of the Complexities of Coping Behavior in The Adirondack Wilderness. **Leisure Sciences** 26 (3): 281 – 293.

Kuss, f., A. Grraefe and J. Vaske. 1990. **Visitor Impact Management: A Review of Research**. National Parks and Conservation Association, Washington, D.C.

Morris, C. 2004. **Conflict in Health Care Settings: The Role of Apologies." Part of a workshop on Managing Conflict in Health Care Settings: Principles, Practices, Policies"** King Prajadhipok's Institute, Bangkok.

Schneider, I.E. and W.E. Hammitt. 1995. Visitor Response to Outdoor Recreation Conflict: A Conceptual Approach. **Leisure Sciences** 17 (3): 223 – 234.

Watson, A.E., D.R. Williams and J. J. Daigle. 1991. Sources of Conflict between Hikers and Mountain Bike Riders in the Rattlesnake NRA. **Park and Recreational Administration** 9 (3): 59 – 71.

Shilling, F., J. Boggs and S. Reed. 2012. Recreational System Optimization to Reduce Conflict on Public Lands. **Environmental Management** 50: 381 – 395.

การประเมินศักยภาพของชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันในพื้นที่จังหวัดพะเยา

Assessment of Community Potentiality in Reducing Smog Problem in Phayao Province

สุชัญญา ทองเครือ[1*] สิทธิชัย มุ่งดี[2] และ บุหรัน พันธุ์สวรรค์[1]

Suchanya Thongkrua[1*], Sittichai Moondee[2] and Buran Phansawan[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพชุมชนและถอดบทเรียนชุมชนที่มีศักยภาพในการลดปัญหาหมอกควันในพื้นที่จังหวัดพะเยาจำนวน 5 ตำบล ได้แก่ แม่กา ขุนควร งิม ผาช้างน้อย และสระ รวม 69 ชุมชน เก็บข้อมูลด้วยแบบสัมภาษณ์ระหว่างเดือนสิงหาคม พ.ศ.2559 ถึง มิถุนายน พ.ศ.2560 พบว่า ชุมชนมีศักยภาพในระดับปรับปรุง พอใช้ และดีเท่ากับ 56 ชุมชน (ร้อยละ 81.2) 8 ชุมชน (ร้อยละ 11.6) และ 5 ชุมชน (ร้อยละ 7.2) ตามลำดับ ชุมชนระดับดี 5 ชุมชน ได้แก่ บ้านแม่กาท่าข้าม ต.แม่กา บ้านน้ำริน ต.ขุนควร บ้านแฮะ ต.งิม บ้านน้ำต้ม ต.ผาช้างน้อย และบ้านท่าฟ้าเหนือ ต.สระ ตัวอย่างกิจกรรมที่ประสบผลสำเร็จในการลดปัญหาหมอกควัน เช่น การคัดแยกขยะและทำปุ๋ยหมัก การตั้งกฎระเบียบชุมชน การไถกลบต่อซัง การทำแนวกันไฟ และทีมอาสาสมัครเฝ้าระวังลาดตระเวนการเผาในที่โล่ง เป็นต้น โดยมีปัจจัยสู่ความสำเร็จ เช่น ศักยภาพของผู้นำชุมชน วิธีชีวิตแบบเครือญาติ การมีส่วนร่วมในการตัดสินใจของชุมชน และการสนับสนุนจากภาครัฐ เป็นต้น

ABSTRACT

The objectives of this research were to assess community potentiality and lesson learned in reducing smog problem in Phayao province including 5 subdistricts as Mae ka, Khun Khuan, Ngim, Pha Chang Noi and Sa in total of 69 communities.In-depth interview was used to collect data from August 2016 to June 2017. The results were found that communities which shown potentiality in improvement, satisfactory and good level are 56 communities (81.2%), 8 communities (11.6%) and 5 communities (7.2%), respectively. 5 communities for good level are Ban Mae Ka Tha Kham Tambon Mae ka, Ban Nam Rin Tambon Khun Khuan, Ban Hae Tambon Ngim, Ban Nam Tom Tambon Pha Chang Noi and Ban Ta Fa Nue Tambon Sa. The examples of community participation in reducing the smog problem are solid waste separation and composting, community rules and regulations, incorporation of corn stove, firebreaks and voluntary monitoring for open burning, etc.The key factors that result effective of community participation in solving the smog problem are community leadership, relative lifestyle, participatory community decision and supports from state agencies, etc.

Key Words: community potentiality, smog problem, Phayao province

[*]Corresponding author; e-mail address: **suchanya_9@yahoo.com**

[1]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา พะเยา 56000

[1] Major of Environmental Science, School of Energy and Environment, University of Phayao, Phayao 56000

[2]สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 2 ลำปาง 52000

[2]Regional Environmental Office 2, Lampang 52000

คำนำ

จังหวัดพะเยาเป็นหนึ่งจังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยที่ประสบกับปัญหามลพิษจากหมอกควันอย่างรุนแรงในระหว่างเดือนมกราคมถึงเมษายน ตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 เป็นต้นมา มีค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM_{10}) สูงเกินค่ามาตรฐานเป็นประจำทุกปี จากผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศของจังหวัดพะเยา พบว่า ปี พ.ศ. 2559 มีจำนวนวันที่PM_{10} สูงเกินค่ามาตรฐานจำนวน 22 วัน และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 210 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รวมทั้งจุดความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2558 โดยในปี พ.ศ. 2559 มีจุดความร้อนในช่วงเดือนมกราคมถึงพฤษภาคม ทั้งหมด 419 จุด ซึ่งเพิ่มขึ้นจากทุกปีที่ผ่านมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2556 ปัญหาหมอกควันในจังหวัดพะเยาเกิดจากสาเหตุหลักคือ การเผาป่า เผาหญ้าข้างถนน การเผาขยะหรือสิ่งเหลือใช้ในชุมชน และการเผาเศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) เช่นเดียวกันกับจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดแม่ฮ่องสอนที่มีสาเหตุหลักจากการเผาในพื้นที่โล่งทั้งจากในพื้นที่ป่า พื้นที่การเกษตรและพื้นที่ชุมชน (ณัฐชยา, 2556; วีรพล, 2556) ซึ่งปัญหาหมอกควันนี้เป็นปัญหาที่สำคัญระดับประเทศ ส่งผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของประชาชน ได้แก่ ผลกระทบต่อสุขภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรคระบบทางเดินหายใจในผู้สูงอายุและเด็กที่มีภูมิต้านทานต่ำ (Chen *et al*., 2017) เนื่องจากในหมอกควันมีสารมลพิษทางอากาศปนอยู่มากมาย ได้แก่ ฝุ่นละออง (PM_{10}, $PM_{2.5}$) (Wiriya *et al*., 2013; Phairuang *et al*., 2017) ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) สารอินทรีย์ระเหย (VOC_S) (Guan *et al*., 2017) ไดออกซินและฟูแรน รวมทั้งสารก่อมะเร็งพวก PAH_S (Wielgosinski *et al*., 2017) นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความเสียหายต่อบ้านเรือน บดบังทัศนวิสัย และเป็นอุปสรรคในการคมนาคมขนส่ง รวมทั้งส่งผลกระทบต่อการท่องเที่ยวภายในจังหวัด การแก้ไขปัญหาหมอกควันจึงเป็นสิ่งที่สำคัญโดยอาศัยการมีส่วนร่วมของชุมชน การมีผู้นำชุมชน กำนันและผู้ใหญ่บ้านที่มีศักยภาพ และให้ความร่วมมือกับภาครัฐ (อรวรรณ, 2554; รัชฎาพร, 2555) ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงศึกษาการมีส่วนร่วมของชุมชนโดยการประเมินศักยภาพชุมชนและถอดบทเรียนชุมชนที่มีศักยภาพในการลดปัญหาหมอกควันในพื้นที่จังหวัดพะเยา เพื่อก่อให้เกิดมาตรการทางสังคมสำหรับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติของชุมชน การลดการเผาในที่โล่ง การลดการเกิดไฟป่า รวมทั้งลดผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของประชาชนพื้นที่จังหวัดพะเยา ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพชีวิตที่ดีของประชาชนในพื้นที่ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือในการเก็บข้อมูล

เครื่องมือในการเก็บข้อมูลประกอบด้วยแบบสำรวจข้อมูลพื้นฐานของชุมชน และแบบประเมินศักยภาพชุมชนในการป้องกันและควบคุมปัญหาหมอกควันและการเผาในที่โล่ง มีเนื้อหา 6 ด้าน ได้แก่ การเสริมสร้างความเข้มแข็งของชุมชน การใช้กฎระเบียบของชุมชน การมีส่วนร่วมของชุมชน การลดการเผาในพื้นที่ป่า การลดการเผาในพื้นที่การเกษตรของชุมชน และการจัดการขยะในชุมชนเพื่อลดการเผา โดยผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) จากผู้เชี่ยวชาญของสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จังหวัดพะเยา จังหวัดน่าน และจังหวัดลำปาง รวมทั้งผู้เชี่ยวชาญจากมหาวิทยาลัยพะเยา รวม 4 ท่าน รวมทั้งแบบบันทึกหรือแบบสัมภาษณ์การถอดบทเรียนชุมชนที่มีศักยภาพในการลดปัญหาหมอกควัน

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. จัดทำแบบสำรวจข้อมูลพื้นฐานของชุมชน แบบประเมินศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควัน และแบบสัมภาษณ์การถอดบทเรียนชุมชนที่มีศักยภาพในการลดหมอกควัน

2. คัดเลือกพื้นที่ศึกษาของจังหวัดพะเยา ซึ่งพิจารณาจากตำบลที่มีจำนวนการเกิดจุดความร้อน (Hotspot) มากที่สุด 3 ลำดับแรก จากข้อมูลย้อนหลัง 3 ปี ตั้งแต่ปี 2556 ถึง 2558 ซึ่งมีทั้งหมด 5 ตำบล เก็บข้อมูลในทุกชุมชน (หมู่บ้าน) ของแต่ละตำบล ได้แก่ ต.แม่กา อ.เมืองพะเยา จำนวน 18 ชุมชน ต.ขุนควร อ.ปง จำนวน 12 ชุมชน ต.งิม อ.ปง จำนวน 19 ชุมชน ต.ผาช้างน้อย อ.ปง จำนวน 7 ชุมชน และต.สระ อ.เชียงม่วน จำนวน 13 ชุมชน รวมทั้งสิ้นจำนวน 69 ชุมชน และดำเนินการเก็บข้อมูลด้วยแบบสำรวจข้อมูลพื้นฐานของชุมชน และแบบประเมินศักยภาพชุมชนในการลดปัญหามลพิษจากหมอกควัน ในระหว่างเดือนสิงหาคม พ.ศ.2559 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ.2560

3. สรุปและวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติด้วยสถิติ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อใช้รายงานผลการวิจัยเชิงพรรณนาสำหรับสถานภาพของชุมชนในการลดปัญหาหมอกควัน และจัดกลุ่มหมู่บ้านตามศักยภาพชุมชน สำหรับเกณฑ์ในการประเมินศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันจากแบบประเมินที่ประกอบไปด้วยเนื้อหา 6 ด้าน (กรมควบคุมมลพิษ, 2555ก) แต่ละด้านจะแบ่งเป็นประเด็นย่อย ๆ โดยในแต่ละประเด็นย่อย ถ้ามีการดำเนินงานครบถ้วน ให้ประเด็นละ 2 คะแนน ถ้ามีการดำเนินงานบางส่วน ให้ประเด็นละ 1 คะแนน และถ้าไม่มีการดำเนินงาน ให้ประเด็นละ 0 คะแนน เมื่อรวบรวมคะแนนครบทั้ง 6 ด้าน แล้วจึงรายงานผลด้วยสถิติร้อยละ และนำค่าคะแนนรวมในรูปร้อยละไปเทียบกับเกณฑ์การประเมินศักยภาพดังนี้ คือ ระดับดีมากมีคะแนนรวมมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 ระดับดีมีคะแนนรวมร้อยละ 70-79 ระดับพอใช้มีคะแนนรวมร้อยละ 60-69 และระดับปรับปรุงมีคะแนนรวมน้อยกว่าร้อยละ 60 (กรมควบคุมมลพิษ, 2555ข)

4. ถอดบทเรียนหมู่บ้านที่มีผลการประเมินศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมากด้วยแบบสัมภาษณ์การถอดบทเรียน การสัมภาษณ์เชิงลึกผู้นำชุมชนและคณะกรรมการชุมชนที่เกี่ยวข้อง ทั้งในลักษณะบุคคลและกลุ่ม/เวทีชาวบ้าน โดยดำเนินการในระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน พ.ศ.2560

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ข้อมูลพื้นฐานของชุมชน

พื้นที่ศึกษาในจังหวัดพะเยา 5 ตำบล รวม 69 ชุมชน แบ่งเป็นชุมชนที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เกษตรจำนวน 15 ชุมชน (ร้อยละ 21.7) พื้นที่เกษตรติดป่าจำนวน 40 ชุมชน (ร้อยละ 58) และในพื้นที่ป่าจำนวน 14 ชุมชน (ร้อยละ 20.3) มีจำนวนครัวเรือนทั้งสิ้น 13,761 ครัวเรือน แบ่งเป็นพื้นที่ต.แม่กาจำนวน 5,057 ครัวเรือน ต.ขุนควร จำนวน 2,166 ครัวเรือน ต.งิม จำนวน 3,450 ครัวเรือน ต.ผาช้างน้อย จำนวน 1,159 ครัวเรือน และ ต.สระ จำนวน 1,884 ครัวเรือน พื้นที่วิจัยมีจำนวนประชากรต่อชุมชนระหว่าง 214-4,496 คนต่อชุมชน และเฉลี่ย 705 คนต่อชุมชน ทั้งนี้ชุมชนประกอบอาชีพทำนาจำนวน 8,005 ครัวเรือน (ร้อยละ 58.3) ทำไร่ทำสวนจำนวน 9,910 ครัวเรือน (ร้อยละ 72.2) เลี้ยงสัตว์จำนวน 327 ครัวเรือน (ร้อยละ 2.3) และอื่น ๆ จำนวน 1,494 ครัวเรือน (ร้อยละ 10.8)

ศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควัน

1. คะแนนศักยภาพของชุมชนในลดปัญหาหมอกควัน

ผลคะแนนศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควัน พบว่า ต.แม่กา ต.ขุนควร ต.งิม ต.ผาช้างน้อย และต.สระ มีคะแนนเฉลี่ยรวมทั้ง 6 ด้านเท่ากับ16.9 คะแนน (ร้อยละ 22.0) 36.8 คะแนน (ร้อยละ 41.9) 36.4 คะแนน (ร้อยละ 41.9) 29.6 คะแนน (ร้อยละ 33.6) และ 39.9 คะแนน (ร้อยละ 45.4) ตามลำดับ (Table 1) โดย ต.แม่กา มีค่าคะแนนศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันต่ำที่สุด เนื่องจากลักษณะชุมชนเป็นชุมชนกึ่งเมือง จึงขาดความร่วมมือกับหน่วยงานภาครัฐและจากประชาชนในชุมชนในการดำเนินกิจกรรมลดปัญหาหมอกควันและการเผาในที่โล่ง ทั้งในด้านการจัดทำแผนชุมชน การจัดตั้งศูนย์ป้องกันและแก้ไขปัญหาการเผาในที่โล่ง การกำหนดกฎกติกาชุมชนลดการเผาในที่โล่ง การทำแนวกันไฟ และการจัดทำแนวเขตพื้นที่ การคัดแยกขยะมูลฝอย โดยเฉพาะขาดความร่วมมือในการลดการเผาในพื้นที่เกษตร เช่น การปลูกพืชทดแทนการปลูกข้าวโพด การปลูกพืชหมุนเวียน และการไถกลบตอซัง เป็นต้น ในขณะที่ ต.สระมีค่าคะแนนศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันสูงที่สุด เนื่องจากเป็นชุมชนชนบทที่มีพื้นที่เกษตรติดป่า ประกอบกับพื้นที่ทำการเกษตรต่อครัวเรือนน้อย จึงมีวิถีชีวิตที่ต้องอาศัยการปลูกพืชหมุนเวียนเพิ่มรายได้ และพึ่งพิงอาศัยปัจจัยสี่จากป่า จึงทำให้ชุมชนร่วมมือกันในการป้องกันการเผาในที่โล่งทั้งในพื้นที่เกษตรและพื้นที่ป่า มีการจัดทำแผนชุมชนป้องกันและแก้ไขปัญหาการเผาในที่โล่ง การจัดตั้งศูนย์ป้องกันและแก้ไขปัญหาการเผาในที่โล่ง การกำหนดกฎกติกาชุมชน การปลูกพืชหมุนเวียน การไถกลบตอซัง และการนำเศษวัสดุทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ลดการเผา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวีรพล (2556) ที่พบว่าพื้นที่ อ.แม่แจ่ม จ.เชียงใหม่เป็นชุมชนพื้นที่เกษตรติดป่า ดังนั้นชุมชนควรมีการดำเนินงานเพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหาหมอกควันในรูปแบบที่เหมาะสมกับพื้นที่ เช่น การปลูกพืชแบบไม่ไถ-ไม่เผา การจัดตั้งกองทุนเพื่อป้องกันไฟป่า และการปลูกไม่เศรษฐกิจทดแทนการปลูกข้าวโพด เป็นต้น

Table 1 Score of community potentiality in reducing smog problem

community potentiality	Score of community potentiality (score (%))				
	Mae ka	KhunKhuan	Ngim	Pha Chang Noi	Sa
Community strength	4.2±3.0 (23.1±16.5)	8.2±3.8 (45.4±21.2)	8.2±4.7 (45.6±26.2)	6.1±4.4 (34.1±24.3)	8.8±4.6 (48.7±25.7)
Community rules and regulations	1.9±1.3 (24.3±15.7)	2.7±2.1 (33.3±26.8)	1.9±2.4 (23.7±29.4)	1.9±1.5 (23.2±18.3)	1.7±1.1 (21.2±13.9)
Community participation	2.8±2.3 (46.3±38.6)	4.3±2.0 (70.8±32.7)	4.6±1.9 (76.3±31.6)	3.0±2.4 (50.0±40.8)	4.5±2.4 (74.4±39.4)
Forest fire reduction and control	4.6±7.1 (16.3±25.4)	14.9±5.5 (53.3±19.7)	11.6±8.5 (41.4±30.5)	13.7±6.2 (50.0±22.3)	16.4±5.7 (8.5±20.5)
Agricultural burning reduction	1.9±2.3 (8.8±10.4)	6.8±4.0 (31.1±18.3)	8.3±4.4 (37.8±20.1)	4.3±3.8 (19.5±17.2)	7.8±3.8 (35.3±17.3)
Municipal solid waste management	1.5±1.2 (25.0±19.2)	0 (0)	1.8±1.4 (30.7±23.1)	0.5±1.5 (9.5±25.2)	0.8±0.7 (14.1±11.5)
Total	16.9±14.9 (22.0±15.9)	36.8±15.2 (41.9±17.3)	36.4±17.8 (41.9±17.3)	29.6±17.9 (33.6±20.3)	39.9±15.8 (45.4±18.0)

2. ระดับศักยภาพของชุมชนในลดปัญหาหมอกควัน

เมื่อนำค่าร้อยละของคะแนนเต็มจากแบบประเมินที่แต่ละชุมชนได้รับ แล้วนำมาจัดระดับศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันและการเผาในที่โล่ง ออกเป็น 4 ระดับ คือ ระดับดีมาก (ร้อยละ 80 ขึ้นไป) ระดับดี (ร้อยละ 70-79) ระดับพอใช้ (ร้อยละ 60-69) และระดับปรับปรุง (น้อยกว่าร้อยละ 60) พบว่า ชุมชนในพื้นที่ศึกษามีศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันอยู่ระดับดีจำนวน 5 ชุมชน (ร้อยละ 7.2) ในพื้นที่ตำบลละ 1 ชุมชน ระดับพอใช้จำนวน 8 ชุมชน (ร้อยละ 11.6) และระดับควรปรับปรุงจำนวน 56 ชุมชน (ร้อยละ 81.2) (Table 2) ซึ่งชุมชนในพื้นที่ศึกษาทุกตำบลมีศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันในระดับปรับปรุงมากที่สุดเรียงตามลำดับ ดังนี้ 1.ต.แม่กา 2.ต.ผาช้างน้อย 3.ต.สระ 4.ต.ขุนควร และ 5.ต.งิม โดย ต.แม่กาควรปรับปรุงมากที่สุดในด้านการลดการเผาในพื้นที่เกษตร ต.ผาช้างน้อยควรปรับปรุงมากที่สุดในด้านการกำหนดมาตรการและกฎระเบียบของชุมชน และด้านการลดการเผาในพื้นที่เกษตร ต.สระควรปรับปรุงมากที่สุดในด้านการกำหนดมาตรการและกฎระเบียบของชุมชน การลดการเผาในพื้นที่เกษตร และด้านการจัดการขยะในชุมชนเพื่อลดการเผา และต.งิม ควรปรับปรุงมากที่สุดในด้านการลดการเผาในพื้นที่เกษตร จะเห็นได้ว่าในพื้นที่ศึกษาทุกตำบลมีระดับศักยภาพชุมชนด้านการลดการเผาในพื้นที่เกษตร และการจัดการขยะในชุมชนเพื่อลดการเผาอยู่ในระดับปรับปรุงมากกว่าร้อยละ 80 เนื่องจากชุมชนขาดการดำเนินงานเรื่องการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรนำกลับมาใช้ประโยชน์ การปลูกพืชหมุนเวียนหรือทดแทนการปลูกข้าวโพด การไถกลบหรือไม่ไถไม่เผา การจัดระเบียบการเผาพื้นที่เกษตร การทำแนวกันไฟรอบพื้นที่เกษตร และการจัดกิจกรรมคัดแยกขยะนำกลับมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรเข้ามาส่งเสริมสนับสนุนชุมชนในการดำเนินงานในประเด็นปัญหาดังกล่าว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐชยา (2556); วีรพล (2556) ที่พบว่า ปัญหาหมอกควันในพื้นที่จ.เชียงใหม่ และจ.แม่ฮ่องสอนเกิดจากสาเหตุหลักคือการเผาเพื่อเตรียมพื้นที่เกษตรและการเผาขยะในชุมชน ภาครัฐควรเข้ามาสนับสนุนให้ความรู้และส่งเสริมเทคโนโลยีการเกษตรหรือวิธีการต่างๆในการจัดการเศษวัสดุทางการเกษตร

การถอดบทเรียนชุมชนที่มีศักยภาพในการลดปัญหาหมอกควัน

ตำบลที่มีระดับศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันอยู่ในเกณฑ์ดีหรือดีมาก มีทั้งหมด 5 ชุมชน ได้แก่ บ้านแม่กาท่าข้าม ต.แม่กา อ.เมืองพะเยา บ้านน้ำริน ต.ขุนควร อ.ปง บ้านแฮะ ต.งิม อ.ปงบ้านน้ำต้ม ต.ผาช้างน้อย อ.ปง และบ้านท่าฟ้าเหนือ ต.สระ อ.เชียงม่วน ซึ่งมีผลการถอดบทเรียนทั้ง 5 ชุมชน ในรูปแบบของกิจกรรมการดำเนินงานของชุมชนที่ประสบความสำเร็จ ได้แก่ การกำหนดกฎระเบียบชุมชนในการควบคุมการเผาในที่โล่งและดูแลป่าชุมชน การจัดตั้งศูนย์ควบคุมป้องกันไฟป่าและการเผาในที่โล่ง การวิเคราะห์พื้นที่และประชาชนกลุ่มเสี่ยงการเผาป่าและเผาในที่โล่ง การจัดทำแนวเขตพื้นที่ชุมชน พื้นที่ป่าและพื้นที่เกษตร การจัดทำแนวกันไฟ การลาดตะเวนและควบคุมไฟป่าและการเผาในที่โล่ง การปลูกป่า การบวชป่า การทำฝายชะลอน้ำและการอนุรักษ์น้ำอนุรักษ์ป่าของชุมชน การจัดระเบียบหรือวางแผนการเผาโดยมีผู้ใหญ่บ้านและแกนนำเป็นผู้ดูแลควบคุม การปลูกพืชหมุนเวียนงดการเผาและการไถกลบลดการเผา การทำปุ๋ยหมักจากขยะมูลฝอยและเศษวัสดุทางการเกษตรและการทำเสวียน ธนาคารขยะและการคัดแยกขยะของชุมชน การเลี้ยงไส้เดือนและการทำน้ำหมักชีวภาพ การปลูกจิตสำนึก การสื่อสารประชาสัมพันธ์และสร้างความรู้ความเข้าใจ (Figure 1)

Table 2 Level of community potentiality in reducing smog problem

Study area/ Tambon	Level of community potentiality (community (%))						
	Community strength	Community rules and regulations	Community participation	Forest fire reduction and control	Agricultural burning reduction	Municipal solid waste management	Total
Mae ka							
Improvement	17 (94.4)	17 (94.4)	12 (66.7)	6 (85.7)	18 (100)	17 (94.4)	17 (94.4)
Satisfactory	0	1 (5.6)	1 (5.5)	0	0	0	0
Good	0	0	0	0	0	0	1 (5.6)
Excellent	1 (5.6)	0	5 (27.8)	1 (14.3)	0	1 (5.6)	0
Khun Khuan							
Improvement	10 (83.2)	9 (75.0)	4 (33.3)	6 (50.0)	11 (91.7)	12 (100)	10 (83.2)
Satisfactory	1 (8.4)	0	1 (8.4)	4 (33.4)	1 (8.3)	0	1 (8.4)
Good	0	3 (25.0)	0	1 (8.3)	0	0	1 (8.4)
Excellent	1 (8.4)	0	7 (58.3)	1 (8.3)	0	0	0
Ngim							
Improvement	10 (52.6)	17 (89.4)	4 (21.1)	9 (60.0)	19 (100)	16 (84.2)	12 (63.1)
Satisfactory	7 (36.8)	0	2 (10.5)	1 (6.7)	0	1 (5.3)	6 (31.6)
Good	1 (5.3)	1 (5.3)	0	4 (26.6)	0	0	1 (5.3)
Excellent	1 (5.3)	1 (5.3)	13 (68.4)	1 (6.7)	0	2 (10.5)	0
Pha Chang Noi							
Improvement	6 (85.7)	7 (100)	4 (57.1)	5 (71.4)	7 (100)	6 (85.7)	6 (85.7)
Satisfactory	0	0	1 (14.3)	1 (14.3)	0	1 (14.3)	0
Good	1 (14.3)	0	0	1 (14.3)	0	0	1 (14.3)
Excellent	0	0	2 (28.6)	0	0	0	0
Sa							
Improvement	7 (53.8)	13 (100)	4 (30.8)	6 (46.1)	13 (100)	13 (100)	11 (84.6)
Satisfactory	3 (23.1)	0	0	2 (15.4)	0	0	1 (7.7)
Good	2 (15.4)	0	0	3 (23.1)	0	0	1 (7.7)
Excellent	1 (7.7)	0	9 (69.2)	2 (15.4)	0	0	0

สำหรับปัจจัยสู่ความสำเร็จของชุมชน ได้แก่ ผู้นำชุมชน (ผู้ใหญ่บ้าน) และคณะกรรมการหมู่บ้านที่เข้มแข็ง ความร่วมมือของชุมชนร่วมคิด ร่วมทำ และร่วมตัดสินใจ การได้ใช้ประโยชน์จากป่าชุมชนของประชาชนโดยเท่าเทียมกัน การสนับสนุนจากหน่วยงานภาครัฐ เช่น องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จังหวัดพะเยา การกำหนดช่วงเวลาห้ามเผาเด็ดขาดของทางจังหวัดพะเยา การบันทึกผลการดำเนินงานทุกขั้นตอนของผู้นำชุมชน (ผู้ใหญ่บ้าน) วิธีชีวิตแบบเครือญาติแบบพึ่งพาอาศัยกัน ร่วมมือกันซึ่งกันละกัน ความจริงจังในการลงโทษผู้กระทำผิดหรือผู้ที่ก่อให้เกิดไฟป่าหรือการเผาในที่โล่ง และ

โครงการพระราชดำริเกษตรบนที่สูงในพื้นที่เพื่อสนับสนุนการปลูกพืชทดแทนการเผา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรัชฎาพร (2555); ณัฐชยา (2556) ที่พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของการมีส่วนร่วมของประชาชนในการป้องกันและแก้ไขปัญหาหมอกควันในพื้นที่ จ.เชียงใหม่ และจ.แม่ฮ่องสอน ได้แก่ ศักยภาพของผู้นำชุมชน ความเชื่อและศรัทธาในตัวผู้นำชุมชน ความสัมพันธ์ที่ดีของคนในชุมชนแบบระบบเครือญาติ และการสนับสนุนจากหน่วยงานภาครัฐ

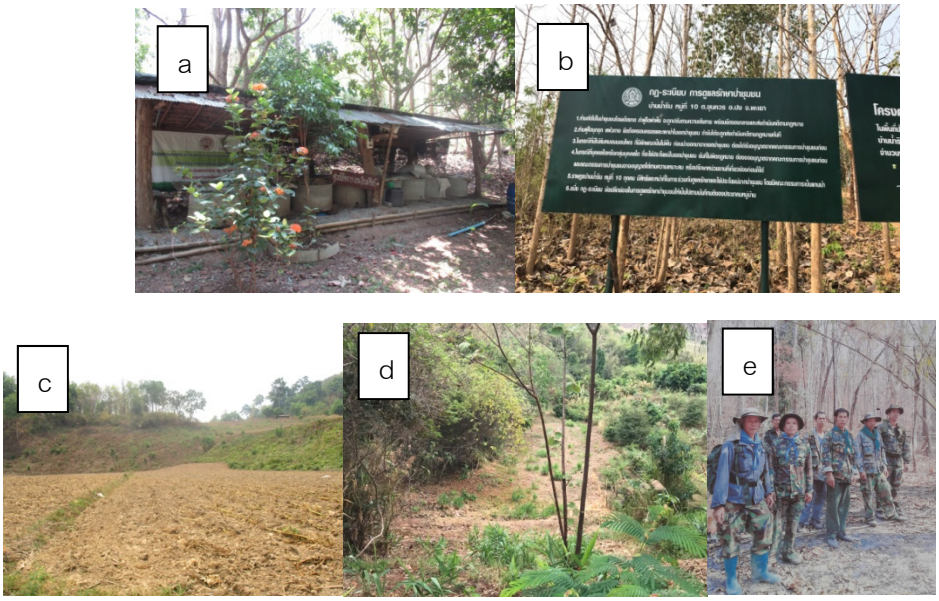


Figure 1 Activities of community participation to solve the smog problem as a:solid waste separation and composting (Ban Mae Ka Tha Kham), b:community rules and regulations (Ban Nam Rin), c:incorporation of corn stove (Ban Hae), d:firebreaks (Ban Nam Tom) and e:voluntary monitoring for open burning (Ban Ta Fa Nue)

สรุป

การประเมินศักยภาพชุมชนในการลดปัญหาหมอกควันในพื้นที่จังหวัดพะเยา พบว่า ชุมชนมีศักยภาพในการลดปัญหาหมอกควันอยู่ในระดับดีมีทั้งหมด 5 ชุมชน (ร้อยละ 7.2) ได้แก่ บ้านแม่กาท่าข้าม ต.แม่กา อ.เมืองพะเยา บ้านน้ำริน ต.ขุนควร อ.ปง บ้านแฮะ ต.งิม อ.ปง บ้านน้ำต้ม ต.ผาช้างน้อย อ.ปง และบ้านท่าฟ้าเหนือ ต.สระ อ.เชียงม่วน ระดับพอใช้จำนวน 8 ชุมชน (ร้อยละ 11.6) และระดับปรับปรุงจำนวน 56 ชุมชน (ร้อยละ 81.2) และมีตัวอย่างกิจกรรมที่ประสบผลสำเร็จในการลดปัญหาหมอกควัน เช่น การจัดตั้งศูนย์ควบคุมป้องกันไฟป่าและการเผาในที่โล่ง การจัดทำแนวเขตพื้นที่ชุมชน พื้นที่ป่าและพื้นที่เกษตร การจัดระเบียบการเผา การปลูกพืชหมุนเวียนลดการเผา และการไถกลบลดการเผา เป็นต้น โดยมีปัจจัยสู่ความสำเร็จ เช่น ผู้นำชุมชน (ผู้ใหญ่บ้าน) และคณะกรรมการชุมชนที่เข้มแข็ง วิถีชีวิตแบบเครือญาติพึ่งพาอาศัยร่วมมือซึ่งกันละกัน ความร่วมมือร่วมคิดร่วมตัดสินใจของชุมชน การกำหนดห้วงเวลาห้ามเผาเด็ดขาดของทางจังหวัด และการสนับสนุนจากภาครัฐ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยพะเยาที่สนับสนุนทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2559 ขอขอบคุณสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดพะเยา และสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 2 ลำปาง ที่ช่วยประสานงานกับชุมชนในพื้นที่ศึกษาและอนุเคราะห์ข้อมูลที่จำเป็นในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2555ก. **คู่มือแนวทางการบริหารจัดการปัญหามลพิษจากหมอกควันและการเผาในที่โล่งในระดับพื้นที่**. 24 หน้า.

กรมควบคุมมลพิษ. 2555ข. **เกณฑ์ประเมินศักยภาพชุมชนในการจัดการมลพิษหมอกควันและการเผาในที่โล่ง "ชุมชนมาตรฐาน หมู่บ้านปลอดการเผา"**. 6 หน้า.

กรมควบคุมมลพิษ. 2560. **แผนปฏิบัติการป้องกันและแก้ไขปัญหาหมอกควันภาคเหนือ ปี 2560**. 37 หน้า.

ณัฐชยา อุ่นทองดี. 2556. **การมีส่วนร่วมของประชาชนในการป้องกันและแก้ไขมลพิษทางอากาศจากหมอกควันในจังหวัดแม่ฮ่องสอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

รัชฎาพร พิละกันธา. 2555. **การมีส่วนร่วมของชุมชนในการแก้ไขปัญหาหมอกควันในตำบลหนองแฝก อำเภอสารภี จังหวัดเชียงใหม่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วีระพล มนตรี. 2556. **ปัญหาและอุปสรรคในการแก้ไขปัญหาหมอกควันขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในอำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อรวรรณ หลังสัน. 2554. **ศักยภาพของกำนัน ผู้ใหญ่บ้านในการแก้ไขปัญหาหมอกควันในอำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Chen, H., Y. Lin, Q. Su and L. Cheng. 2017. Spatial variation of multiple air pollutions potential contributions to all-cause, respiratory, and cardiovascular mortality across China in 2015-2016. **Atmospheric Environment** 168: 23-35.

Guan, Y., G. Chen, Z. Cheng, B. Yan and L. Hou. 2017. Air pollutant emissions from straw open burning: A case study in Tianjin. **Atmospheric Environment** 171: 155-164.

Phairuang, W., M. Hata and M. Furuuchi. 2017. Influence of agricultural activities, forest fires and agro-industries on air quality in Thailand. **Journal of Environmental Science** 52: 85-97.

Wielgosinski, G., P. Lechtanska and O. Namiecinska. 2017. Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion. **Journal of the Energy Institute** 90: 787-796.

Wiriya, W., T. Prapamontol and S. Chantara. 2013. PM10-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in Chiang Mai (Thailand): Seasonal variations, source identification, health risk assessment and their relationship to air-mass movement. **Atmospheric Research** 124: 109-122.

การเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสละลายน้ำในอ่าวไทยตอนใน

Variation of Dissolved Phosphorus and Form in the Inner Gulf of Thailand

ณัชชา สุพวานิช[1*] และ มารุต สุขสมจิตร[2]

Natcha Supawanich[1*] and Marut Suksomjit[2]

บทคัดย่อ

การศึกษาความอุดมสมบูรณ์ของฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำทั้งในรูปอนินทรีย์และอินทรีย์ในอ่าวไทยตอนใน 2 ช่วงฤดู คือ ช่วงฤดูแล้ง และ ช่วงฤดูต้นน้ำหลาก ผลการศึกษาพบว่าปริมาณความเข้มข้น TDP DIP และ DOP ในช่วงฤดูต้นน้ำหลากมีค่าสูงกว่าช่วงฤดูแล้ง โดยรูปแบบของ TDP ที่พบส่วนใหญ่อยู่ในรูป DOP และพบว่าปริมาณ TDP DIP และ DOP ในช่วงฤดูแล้งมีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าความเค็ม ($r = -0.57$, -0.56 และ -0.43 ($p<0.05$)) แตกต่างจากช่วงฤดูต้นน้ำหลากที่พบว่าปริมาณ DOP เท่านั้นที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าความเค็มและเป็นความสัมพันธ์เชิงบวก ($r = 0.40$ ($p<0.05$)) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแหล่งที่มาของฟอสฟอรัสละลายน้ำในฤดูแล้งมาจากการไหลเข้าของแม่น้ำ ซึ่งแตกต่างจากฤดูต้นน้ำหลาก

ABSTRACT

This study investigated the abundance of dissolved phosphorus, in both inorganic and organic forms, in the Inner Gulf of Thailand. TDP, DOP, and DIP concentration in early monsoon season were higher than dry season. Within the TDP pool, DOP was the dominant form of dissolved phosphorus. Strong negative correlation between TDP, DOP, DIP, and salinity were found ($r = -0.57$, -0.56, and -0.43 ($p<0.05$)) in dry season. Positive correlation between DOP and salinity was found in early monsoon season but no relationship was found between salinity and other forms of dissolved phosphorus. Our finding suggested the riverine input was a source of dissolved phosphorus in dry season which was different from monsoon season.

Key Word: Phosphorus, Dissolved Inorganic Phosphorus, Dissolved Organic Phosphorus, Inner Gulf of Thailand

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

[1]มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) 99 ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

[1]Thammasat University (Rangsit center), 99 Pahonyotin Road, Klong Neung, Klong Luang, Patumtani 12120

[2]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) 99 ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

[2]Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University (Rangsit center), 99 Pahonyotin Road, Klong Neung, Klong Luang, Patumtani 12120

คำนำ

ฟอสฟอรัส (Phosphorus) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต โดยเป็นส่วนประกอบของสารพันธุกรรม (ดีเอ็นเอ, อาร์เอ็นเอ) และสารที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายทอดพลังงานภายในเซลล์ (เอทีพี) นอกจากนี้ฟอสฟอรัสยังถูกจัดให้เป็นปัจจัยจำกัด (Limiting Factor) ที่ควบคุมปริมาณของแพลงก์ตอนพืช ซึ่งเป็นผู้ผลิตขั้นต้นในแหล่งน้ำ (Wu *et al.*, 2000; Karl *et al.*, 2001) โดยฟอสฟอรัสที่พบในแหล่งน้ำมีที่มาจากกระบวนการตามธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ และอยู่ในรูปแบบที่ละลายน้ำ (Dissolved form) และตะกอนแขวนลอย (Particulate form)

ปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำมีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิตทางชีวภาพ การหมุนเวียนแร่ธาตุ และมีบทบาทในการควบคุมคุณภาพน้ำและคุณภาพสิ่งแวดล้อมทางทะเล (Lin *et al.*, 2013) แหล่งน้ำใดมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงแหล่งน้ำนั้นจะมีความอุดมสมบูรณ์สูง (Eutrophication) ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนพืชและทำให้ปริมาณออกซิเจนในบริเวณนั้นลดลง ในทางตรงข้ามแหล่งน้ำที่มีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำส่งผลให้มีปริมาณแพลงก์ตอนพืชต่ำไปด้วย (Lin *et al.*, 2013; Duan *et al.*, 2016) จากความสำคัญดังกล่าวจึงมีผู้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำจำนวนมาก โดยรูปแบบฟอสฟอรัสที่นิยมทำการศึกษาจะอยู่ในรูปฟอสฟอรัสอนินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Inorganic Phosphate; DIP) เนื่องจากเป็นรูปแบบฟอสฟอรัสที่แพลงก์ตอนพืชสามารถดูดซึมไปใช้ในกระบวนการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนได้ง่าย (Lin and Guo, 2016; Lin *et al.*, 2016) ในขณะที่การศึกษาฟอสฟอรัสในรูปแบบอื่นมีน้อยกว่า อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยพบว่าแพลงก์ตอนพืชบางชนิดสามารถนำเอาฟอสฟอรัสอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Phosphate; DOP) ไปใช้ประโยชน์เพื่อการเจริญเติบโตได้เช่นกัน

จากเหตุผลดังกล่าวผู้ศึกษาวิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ โดยทำการศึกษาในพื้นที่อ่าวไทยตอนใน (Inner Gulf of Thailand) เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวเป็นแหล่งรองรับน้ำที่ระบายจากแม่น้ำสายหลัก ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำบางประกง แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำแม่กลอง และแม่น้ำเพชรบุรี ซึ่งมีสารอาหารโดยเฉพาะอย่างยิ่งฟอสฟอรัสปลดปล่อยลงมาพร้อมกันด้วย เป็นจุดเริ่มต้นของห่วงโซ่อาหาร รวมทั้งทรัพยากรสัตว์น้ำ ทำให้พื้นที่ดังกล่าวเป็นแหล่งทำการประมงที่มีสำคัญ ข้อมูลที่ได้จะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสทั้งในเชิงปริมาณและรูปแบบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการจัดการทรัพยากรสัตว์น้ำในบริเวณพื้นที่อ่าวไทยตอนใน

อุปกรณ์และวิธีการ

สถานที่เก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างน้ำทะเลในพื้นที่อ่าวไทยตอนใน โดยมีสถานีเก็บตัวอย่างน้ำทั้งสิ้น 28 สถานี แบ่งตามระดับความลึก ครอบคลุมพื้นที่ทะเลชายฝั่งของจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เพชรบุรี สมุทรสงคราม สมุทรสาคร กรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ ฉะเชิงเทรา และชลบุรี (Figure 1) ด้วยเรือเกษตรศาสตร์ 1 โดยทำการเก็บ 2 ครั้ง ในเดือนเมษายนและสิงหาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งเป็นตัวแทนของช่วงฤดูแล้ง และช่วงต้นฤดูน้ำหลาก

วิธีการเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างน้ำที่ผิวน้ำ (0.5 เมตร จากผิวน้ำ) โดยใช้ถังพลาสติกที่ผ่านการล้างทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว กรองตัวอย่างน้ำทันทีผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter, GF/F) ที่ผ่านการเผาที่ 550 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่อาจตกค้าง เก็บตัวอย่างน้ำที่กรองได้ในขวดแก้วสีชาที่ผ่านการล้างทำความสะอาด และแช่กรด HCl ความเข้มข้น 1N นาน 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมดในที่เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระหว่างการขนส่งไปยังห้องปฏิบัติการ

การศึกษาคุณภาพน้ำทั่วไป

ตรวจวัดคุณภาพน้ำทั่วไปในจุดที่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ โดยตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (ºC) ความเค็ม (psu) ค่าการนำไฟฟ้า (µs/cm) ปริมาณออกซิเจนละลาย (mg/l) และความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่องตรวจวัดภาคสนาม Multi-parameter water quality monitor รุ่น (YSI 6600)

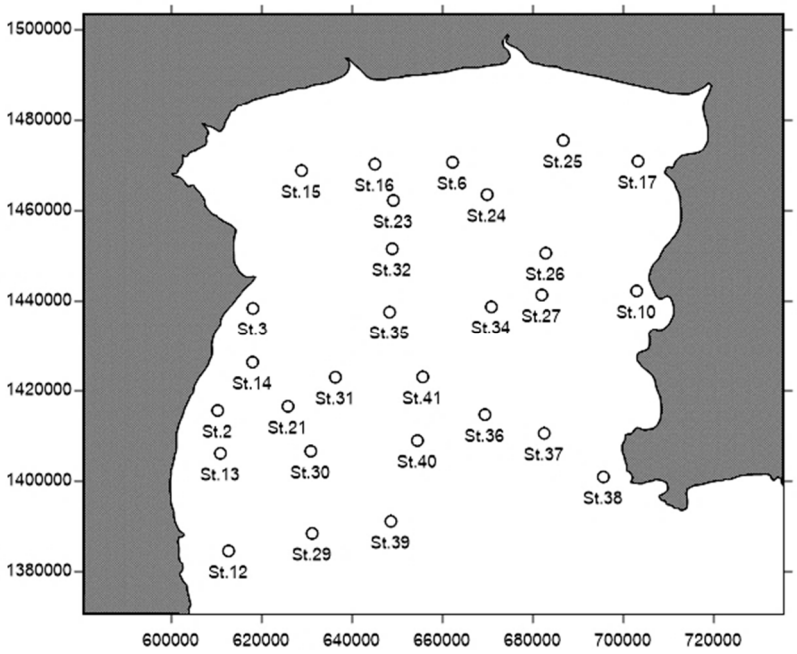


Figure 1 Sampling locations in the Inner Gulf of Thailand during April and August 2017.

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

วิเคราะห์หาปริมาณ TDP ในตัวอย่างน้ำที่กรองได้ โดยใช้วิธีการย่อยด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตที่อุณหภูมิต่ำ ตามวิธีของ Huang and Zhang (2009) โดยนำตัวอย่างน้ำ 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดพลาสติก PPCO (Nalgene) แบบมีฝาปิด ขนาด 30 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 5% 1 มิลลิลิตร ปิดฝาให้แน่น ก่อนนำไปย่อยในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดปริมาณฟอสเฟตตามวิธีการของ Murphy and Riley (1962) Parsons *et al.* (1984) ในส่วนของปริมาณ DIP สามารถวัดได้โดยตรงไม่ต้องผ่านกระบวนการย่อย ในส่วนของปริมาณ DOP จะเท่ากับผลต่างระหว่างค่า TDP และ DIP

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบของ TDP DIP และ DOP รวมทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่าง TDP DIP และ DOP กับปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient) โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel 2016

ผลและวิจารณ์

การเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณ

Table 1 แสดงปริมาณ TDP DIP และ DOP ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำที่เก็บในบริเวณพื้นที่อ่าวไทยตอนในทั้งในช่วงฤดูแล้ง และฤดูต้นน้ำหลาก ในส่วนของ Figure 2 แสดงการกระจายของปริมาณ DOP และ DIP ที่พบในบริเวณพื้นที่อ่าวไทยตอนในทั้งสองช่วงฤดู ผลการศึกษาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของ TDP DIP และ DOP ในช่วงฤดูต้นน้ำหลากมีค่าสูงกว่าช่วงฤดูแล้ง สอดคล้องกับผลการศึกษาของธวัชชัย และคณะ (2556) ที่พบว่าปริมาณฟอสเฟตในอ่าวไทยตอนใน ในเดือนสิงหาคมมีค่าสูงกว่าเดือนมีนาคม โดยค่าเฉลี่ยของ TDP DIP และ DOP ในช่วงฤดูต้นน้ำหลากเท่ากับ 2.14 0.30 และ 1.88 µM ในขณะที่ค่าเฉลี่ยในช่วงฤดูแล้งมีค่าเท่ากับ 0.68 0.16 และ 0.59 µM ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการชะล้างจากแผ่นดิน (Surface runoff)

Table 1 Average concentrations of TDP, DIP and DOP in the Inner Gulf of Thailand during April (Dry season) and August 2017 (flooding season)

Station	April (Dry season)			August (flooding season)		
	TDP (µM)	DIP (µM)	DOP (µM)	TDP (µM)	DIP (µM)	DOP (µM)
St.2-10 (<5 m)	1.024 ± 0.60	0.199 ± 0.09	1.024 ± 0.54	1.914 ± 1.05	0.384 ± 0.21	1.529 ± 0.85
St.12-20 (5 -10 m)	1.042 ± 1.03	0.133 ± 0.06	0.909 ± 1.03	2.079 ± 0.94	0.415 ± 0.48	1.664 ± 0.94
St.21-28 (10-15 m)	0.738 ± 1.59	0.274 ± 0.59	0.464 ± 1.00	2.451 ± 1.23	0.371 ± 0.15	2.080 ± 1.22
St.29-38 (15-20 m)	0.458 ± 0.62	0.118 ± 0.13	0.458 ± 0.53	2.103 ± 1.59	0.206 ± 0.11	2.103 ± 1.60
St.39-42 (>20 m)	0.139 ± 0.12	0.054 ± 0.05	0.085 ± 0.07	2.157 ± 0.32	0.142± 0.03	2.015 ± 0.34
Average	0.680 ± 0.79	0.156 ± 0.18	0.588 ± 0.63	2.141 ± 1.03	0.304 ± 0.20	1.880 ± 0.99

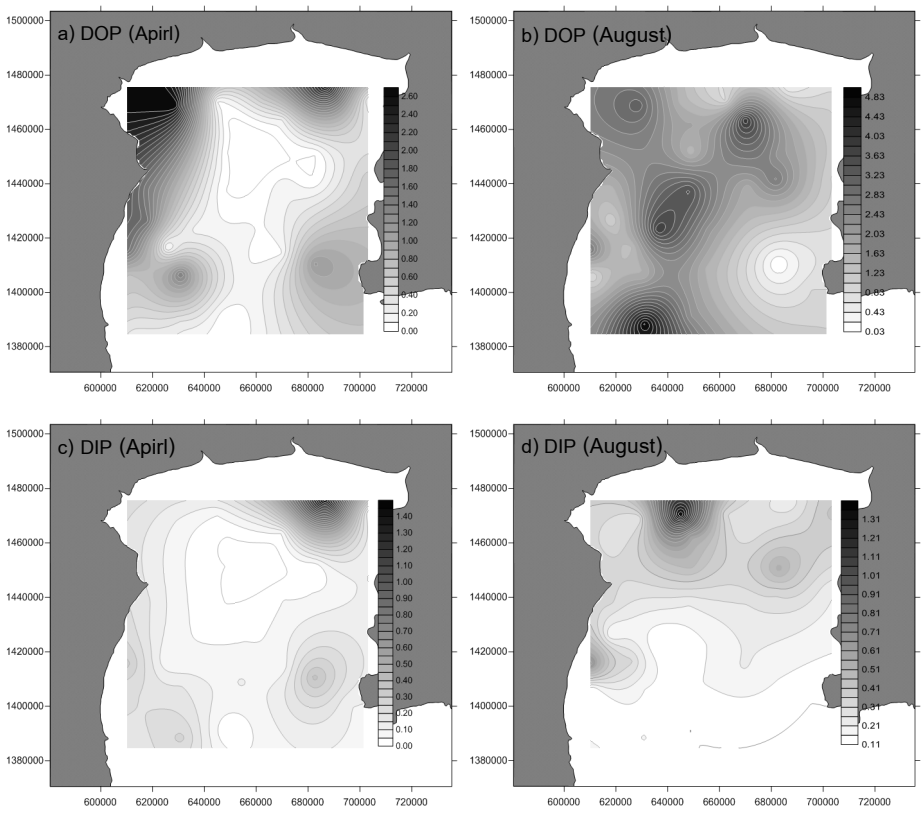


Figure 2 Distributions of DOP and DIP in the Inner Gulf of Thailand during April (a, c) and August (b, d) 2017

รูปแบบของฟอสฟอรัส

ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบของฟอสฟอรัสที่ตรวจพบได้ทั้ง 2 ช่วงเวลา คือช่วงฤดูแล้งและต้นฤดูน้ำหลาก ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ DOP โดยมีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 68.72 และ 82.02 ตามลำดับในขณะที่ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป DIP มีสัดส่วนเพียงร้อยละ 31.28 และ 17.98 ตามลำดับ (Figure 3) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Duan *et al.* (2016) ที่พบว่ารูปแบบของฟอสฟอรัสที่ตรวจพบในบริเวณทะเลเหลืองของประเทศจีนส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ DOP โดยมีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 85 ของปริมาณ TDP เช่นเดียวกับการศึกษาของ Lin (2016) ที่พบว่ารูปแบบของฟอสฟอรัสที่ตรวจพบส่วนใหญ่อยู่ในรูป DOP (ร้อยละ 85) Johannes (1964); Lin *et al.* (2012) รายงานว่า DOP ที่พบค่าสูงในบริเวณผิวน้ำเป็นผลมาจากกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในทะเล และการสลายตัวของสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้ว

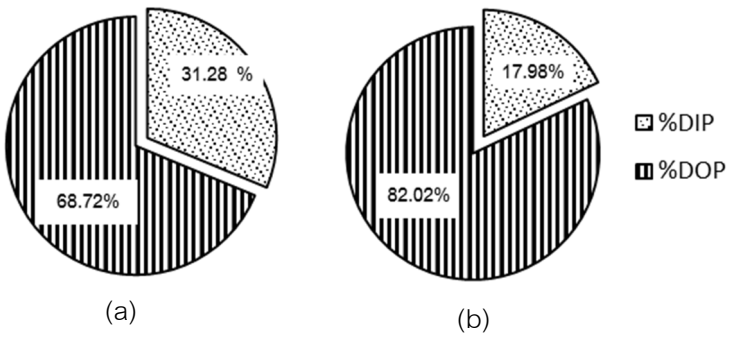


Figure 3 Partitioning of DIP and DOP in the Inner Gulf of Thailand during April (a) and August (b) 2017

ความสัมพันธ์กับปัจจัยแวดล้อม

คุณภาพน้ำทะเลในช่วงที่มีการเก็บตัวอย่างมีค่าความเค็มผันแปรอยู่ในช่วง 31.55-33.34 psu (ช่วงฤดูแล้ง) และ 16.53-34.03 psu (ฤดูต้นน้ำหลาก) และเมื่อนำค่าดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์พบว่าปริมาณ TDP DIP และ DOP มีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าความเค็ม (r= -0.57, -0.56 และ -0.43 ($p<0.05$)) ในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Meng *et al.* (2015) ที่ศึกษาพฤติกรรมของ DIP บริเวณปากแม่น้ำฉางเจียง และพบว่าปริมาณ DIP ในน้ำมีค่าลดลงเมื่อความเค็มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมผสานระหว่างน้ำจืดที่มีปริมาณ DIP สูงกับน้ำทะเล สรุปได้ว่า DIP มีแหล่งที่มาจากแม่น้ำ อย่างไรก็ตามในฤดูต้นน้ำหลากกลับพบว่าปริมาณ DOP เท่านั้นที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าความเค็ม (r= 0.40 ($p<0.05$) เป็นผลมาจากการปลดปล่อยจากสิ่งมีชีวิต (Johannes 1964) ในขณะที่ปริมาณ TDP และ DIP ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติกับค่าความเค็ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดของ TDP DIP และ DOP มีการเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล โดยการชะล้างจากแผ่นดินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TDP DIP และ DOP ในช่วงฤดูแล้ง ในขณะที่การใช้/ปลดปล่อยในกระบวนการทางชีวภาพ (Johannes, 1964; Lin *et al.*, 2013) และการดูดกลับ/ปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากตะกอนดินเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะค่าความเค็ม (Meng *et al.*, 2014) มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TDP DIP และ DOP ในช่วงฤดูน้ำหลาก

ข้อมูลจากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้เราทราบถึงปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสในบริเวณอ่าวไทยตอนใน รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฟอสฟอรัสระหว่าง 2 ช่วงฤดู ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเป็นข้อมูลประกอบในการบ่งชี้ระดับความอุดมสมบูรณ์ของอ่าวไทยตอนใน การจัดการทรัพยากรสัตว์น้ำ และใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับงานวิจัยในอนาคตที่เกี่ยวข้องกับฟอสฟอรัสในบริเวณอ่าวไทยตอนใน นอกจากนี้ข้อมูล DOP ที่ตรวจพบยังเป็นประโยชน์ประโยชน์ต่อการคาดการณ์บทบาทของฟอสฟอรัสในรูปแบบดังกล่าวในระบบนิเวศ เนื่องจาก Huang (1999); Ren *et al.* (2016) ศึกษาวิจัยพบว่าแพลงก์ตอนพืชบางชนิด เช่น *Trichodesmium erythraeum* สามารถสร้างเอนไซม์ Alkaline Phosphatase (AP) เพื่อใช้ในการย่อย DOP ให้เป็น DIP เมื่อแหล่งน้ำนั้นมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ (Oligotrophic)

สรุป

ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่าปริมาณความเข้มข้นของ TDP DIP และ DOP ในพื้นที่อ่าวไทยตอนในในช่วงฤดูต้นน้ำหลากมีค่าสูงกว่าช่วงฤดูแล้ง โดยรูปแบบของ TDP ที่พบส่วนใหญ่อยู่ในรูป DOP นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ TDP DIP และ DOP ในช่วงฤดูแล้งมีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าความเค็ม แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลจากแม่น้ำ แตกต่างจากช่วงต้นฤดูน้ำหลากที่พบว่าปริมาณ DOP เท่านั้นที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าความเค็มแต่เป็นความสัมพันธ์เชิงบวก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดของ TDP DIP และ DOP มีการเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์ของ รศ.ดร.เชษฐพงษ์ เมฆสัมพันธ์ ที่สนับสนุนข้อมูลคุณภาพน้ำทั่วไปและการเก็บตัวอย่าง จากโครงการ “การพัฒนานโยบายการจัดการประมงอย่างมีประสิทธิภาพบนพื้นฐานนิเวศ-สังคมภายใต้ธรรมาภิบาลที่ดีเพื่อความยั่งยืนทางการประมงในพื้นที่อ่าวไทยตอนใน”

เอกสารอ้างอิง

ธวัชชัย นาอุดม, อนุกูล บูรณประทีปรัตน์, กิตติยา หอมหวน และ ประสาร อินทเจริญ. 2556. การเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาและพื้นที่ของคุณภาพน้ำทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนบนในสองฤดูกาลช่วงปี พ.ศ. 2552. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา** 18: 32-42.

Duan, L.Q., J.M. Song, H.M. Yuan, X.G. Li and N. Li. 2016. Distribution, partitioning and sources of dissolved and particulate nitrogen and phosphorus in the north Yellow Sea. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 181: 182-195.

Huang, B. and H. Hong. 1999. Alkaline Phosphatase Activity and Utilization of Dissolved Organic Phosphorus by Algae in Subtropical Coastal Waters. **Marine Pollution Bulletin** 39: 205 – 211.

Huang, X.L. and J.Z. Zhang. 2009. Neutral persulfate digestion at sub-boiling temperature in an oven for total Dissolved phosphorus determination in natural waters. **Talanta** 78: 1129-1135.

Johannes, R.E. 1964.Uptake and release of dissolved organic phosphorus by Representatives of a coastal marine ecosystem. **Limnology and Oceanography** 9: 224–234.

Karl, M.D., K.M. Björkman, J.E. Dore, L. Fujieki, D.V. Hebel, T. Houlihan, R.M. Letelier and L.M. Tupas. 2001. Ecological nitrogen-to-phosphorus stoichiometry at station ALOHA. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography** 48: 1529-1566.

Lin, P., L. Guo, M. Chen and Y. Cai. 2013. Distribution, partitioning and mixing behavior of phosphorus species in the Jiulong River estuary. **Marine Chemistry** 157: 93-105.

_____, _____, _____, J. Tong and F. Lin. 2012. The distribution and chemical speciation of dissolved and particulate phosphorus in the Bering Sea and the Chukchi–Beaufort Seas. Deep Sea Research Part II: **Topical Studies in Oceanography** 81–84: 79-94.

_____, V.J. Klump and L. Guo. 2016. Dynamics of dissolved and particulate phosphorus influenced by seasonal hypoxia in Green Bay, Lake Michigan. **Science of the Total Environment** 541: 1070-1082.

Meng, J., Z. Yu, Q. Yao, T.S. Bianchi, A. Paytan, B. Zhao, H. Pan and Y. Peng. 2015. Distribution, mixing behavior, and transformation of dissolved inorganic phosphorus and suspended particulate phosphorus along a salinity gradient in the Changjiang Estuary. **Marine Chemistry** 168: 124-134.

Murphy, J. and J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. **Analytica Chimica Acta** 27: 31-36.

Parson, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. **Pergamon Press**, Oxford.

Ren, L., P. Wang, C. Wang, J. Chen, J. Hou and J. Qian. 2016. Algal growth and utilization of phosphorus studied by combined mono-culture and co-culture experiments. **Environmental Pollution** 220: 274-285.

Wu, J., W. Sunda, E.A. Boyle and D.M. Karl. 2000. Phosphate Depletion in the Western North Atlantic Ocean. **Science** 289: 759-762.

ผลของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อความร้อน ในเมืองเวียงจันทร์ ณ ประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว

Effect of Land Use Change on Urban Heat at Vientiane Capital, Lao PDR

อนุรักษ์ ราชวงศ์[1*] และ สุรัตน์ บัวเลิศ[1]

Anouluck Rathsavong[1*] and Surat Bualert[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ที่ส่งผลต่ออุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน อันได้แก่ อุณหภูมิ และความเร็วลม ในพื้นที่นครหลวงเวียงจันทร์ ประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ขอบเขตที่รัศมีผ่านศูนย์กลาง 5 กิโลเมตรจากสถานีตรวจวัดอุตุนิยมวิทยาของกรมอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยา เปรียบเทียบข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดินและการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในปี ค.ศ. 2003-2016 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่เกษตรกรรมลดลง 50.62 เฮกแตร์ต่อปี ป่าลดลง 33.14 เฮกแตร์ต่อปี และพื้นที่แหล่งน้ำต่าง ๆ ลดลง 14.70 เฮกแตร์ต่อปี พื้นที่แปรสภาพเป็นสิ่งปลูกสร้างและถนน เพิ่มขึ้น 82.95 เฮกแตร์ต่อปี ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.003 องศาเซลเซียสต่อปี หรือ 0.014 เปอร์เซ็นต์ต่อปี และความเร็วกระแสลมเฉลี่ยลดลง 6.5×10^{-4} เมตรต่อวินาทีต่อปี หรือ 0.06 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มจากสิ่งปลูกสร้างที่เพิ่มขึ้นและขยายออกไปทุกทิศทาง ทำให้ความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่นำไปใช้ในการไหลลงดินลดลง และการนำความร้อนไปใช้ในการระเหยไม่เพียงพอ และสัดส่วนการนำความร้อนไปใช้ในการเผาผลาญอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิในอากาศเพิ่มสูงขึ้น.

ABSTRACT

The study on variation of land covers effect to meteorological parameter. The study area has a radius 5 kilometer from Department of Meteorology and Hydrology in Vientiane, Lao PDR, compared data meteorological and land use since 2003 to 2016. The result showed agricultural area decreased 50.62 ha per year, forest area decreased 33.14 ha per year and the water body area decreased 33.14 ha per year. The area had been converted into buildings and roads increased 82.95 ha per year. This affects to the average temperature increased 0.003 Degree Celsius per year or increased 0.014 percent per year and wind speed average decreased 6.5×10^{-4} meter/second or decreased 0.06 percent per year. Which the temperature was increased by addition of building and expansion at all directions. The heat from the solar radiation to use on heat to ground was decreased and the heat to evaporation was not enough, and the proportion of sensible heat effect to increasing temperature.

Key Words: land use change, meteorological characteristics, heat Urban

*Corresponding author; e-mail address: Ranouluck3@yahoo.com

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

จากอดีตในปี ค.ศ. 2003-2016 เป็นเวลา 14 ปีที่ผ่านมา นครหลวงเวียงจันทน์ได้มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์พื้นที่ดินและอุณหภูมิได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ผลเนื่องจากประชากรเมืองเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม รวมถึงสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอาคาร พื้นผิวถนน และคอนกรีต ที่เป็นตัวดูดซับรังสีความร้อนไว้ได้มาก และปลดปล่อยความร้อนสู่บรรยากาศ (Miller, 1997) ซึ่งพื้นที่เดิมถูกแปรสภาพไปเป็นพื้นที่ปลูกสร้างสำหรับที่อยู่อาศัย ตึกอาคาร ถนน และพื้นที่คอนกรีตขยายเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของอาคารเพิ่มขึ้น แต่พืชปกคลุมดินลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้อากาศใกล้ผิวดินมีการเปลี่ยนแปลงและอุณหภูมิในอากาศสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการสะสมความร้อนในผิวซีเมนต์จากพลังความร้อนของดวงอาทิตย์ เมื่ออิ่มตัวก็จะมีการปลดปล่อยความร้อนออกมาได้ช้ากว่าวัสดุชนิดอื่น ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น (กรมอุตุนิยม, 2552) การสะสมพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้แนวโน้มของอุณหภูมิตามสัดส่วนของพืชปกคลุมดินในอนาคต จะส่งผลกระทบให้เกิดเป็นปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมือง (Urban heat island)

เพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ในพื้นที่เขตเมืองที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน อันได้แก่อุณหภูมิและความเร็วลม เพื่อนำผลการศึกษาไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการวางแผนจัดการ การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่เขตเมืองให้มีความเหมาะสม โดยมุ่งเน้นปัจจัยที่ส่งผลต่ออุตุใกล้ผิวดินอันได้แก่อุณหภูมิและความเร็วลม สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและการทำวิจัยในพื้นที่อื่นต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาอยู่ที่นครหลวงเวียงจันทน์ (Vientiane capital) อำเภอสีโคดตระบอง (Sikhodthabong district) มีลักษณะเป็นพื้นที่ราบยาว มี 2 ฤดูกาล คือ ฤดูฝน เริ่มเดือนพฤษภาคม ถึง เดือนตุลาคม (มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 75 – 90 เปอร์เซ็นต์) และ ฤดูแล้ง เริ่มเดือนพฤศจิกา ถึง เมษายน (ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 10 – 25 เปอร์เซ็นต์) ปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์เฉลี่ย 6.3 – 6.5 ชั่วโมงต่อวัน และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 70 – 85 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิเฉลี่ย 27.7 องศาองศาเซลเซียส และ ค่าความต่างระหว่างตอนเที่ยงกับตอนค่ำประมาณ 10 องศาเซลเซียส (พรวิลัย, 2009) พิกัดลองจิจูด ที่ 17°58'12.658" เหนือและเส้นละติจูด ที่ 102°34'14.376" ตะวันออก ระดับความสูงห่างจากน้ำทะเล 171 เมตร ตั้งอยู่ภาคกลาง ของ สปป.ลาว ซึ่งมีการตรวจวัดอุตุวิทยาใกล้ผิวดิน เช่น อุณหภูมิ ความเร็วลม ทิศทางลม วัดในระดับความสูง 10 เมตร พื้นที่ศึกษาห่างจากจุดพิกัดศูนย์กลางออกไป 5 กิโลเมตรเป็นวงกรม ดั่งภาพในพื้นที่ศึกษาที่ได้จากภาพถ่ายทางอากาศ (Figure 1) และ ภาพการใช้ประโยชน์พื้นที่ดิน (Figure 2)

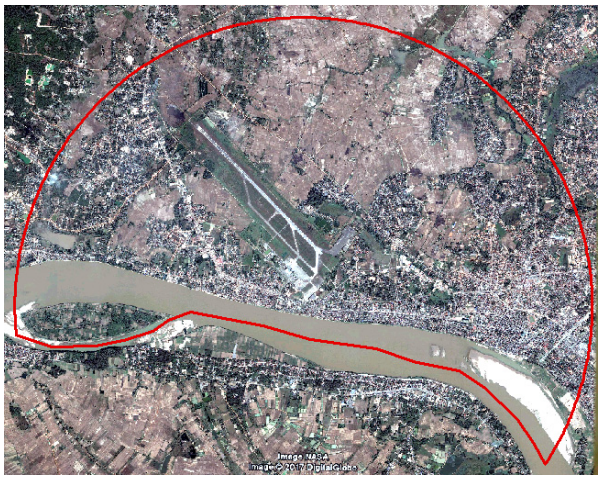


Figure 1 Aerial photo at study area

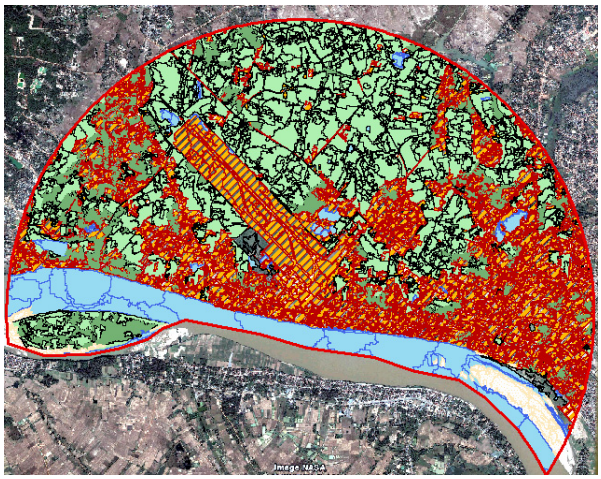


Figure 2 Land use at study area

การเก็บข้อมูล

1) ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี ค.ศ. 2003–2016

โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ที่มีความระเอียด 2×2 ตารางเมตรและข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ได้ความอนุเคราะห์จากกรมพัฒนาที่ดิน สปป.ลาว ในวันที่ 6 พฤศจิกายน 2017

2) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน

โดยใช้ข้อมูลตรวจวัดสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยา รหัส 48940 อยู่ที่นครหลวงเวียงจันทน์ (Vientiane capital) อำเภอสีโคดตระบอง (Sikhodthabong district) ซึ่งบันทึกข้อมูลประกอบมีอุณหภูมิ ความเร็วลมและทิศทางลม โดยจะเก็บทุกๆชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมงต่อวัน เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บวัดอุณหภูมิ (Ordinary thermometer) หน่วยที่ใช้เป็นองศาเซลเซียส เครื่องวัดความเร็วลม (Wind speed measurement) หน่วยที่ใช้เป็นเมตรต่อวินาทีและเครื่องวัดทิศทางลมแบบศรลม (Wind vanes)

การวิเคราะห์ข้อมูล

1) การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน

1.1) การวิเคราะห์ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยใช้โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Arc Map version.10) แล้วทำการปรับแก้ให้ถูกตามประเภทของพื้นที่ตัวจริงจากภาพถ่ายทางอากาศที่มีพื้นที่ เช่น พื้นที่การเกษตรกรรม ป่าไม้ แหล่งน้ำ และพื้นที่เมือง

1.2) วิเคราะห์สัดส่วนและการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในแต่ละปี โดยใช้ข้อมูล ปี 2003, 2008 และ 2016 โดยหาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วง ปี ค.ศ. 2003-2008 และช่วงปี ค.ศ. 2008-2016

2) วิเคราะห์อุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน

นำข้อมูลอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน เช่น อุณหภูมิ ความเร็วลม และทิศทางลม นำมาเฉลี่ยเป็นรายปีจากปี ค.ศ. 2003-2016 พร้อมวิเคราะห์หาแนวโน้มจากข้อมูล

3) หาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินกับอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน

3.1) วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่ศึกษากับอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน

3.2) วิเคราะห์หาแนวโน้มการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่ เช่น พื้นที่การเกษตรกรรม ป่าไม้ แหล่งน้ำ และพื้นที่เมือง

ผลและวิจารณ์ผล

1. การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในบริเวณนครหลวงเวียงจันทร์ สปป. ลาว ช่วงปี ค.ศ. 2003-2016

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน พบว่า พื้นที่เกษตรกรรม ป่าไม้ และแหล่งน้ำมีแนวโน้มลดลง ทั้ง 2 ช่วง โดยลดลงเท่ากับ 311.36 174.05 และ 97.49 เฮกแตร์ ตามลำดับ ในช่วงปี ค.ศ. 2003-2008 และลดลงเท่ากับ 311.76 251.84 และ 79.24 เฮกแตร์ ตามลำดับ ในช่วงปี ค.ศ. 2008-2016 แต่ในทางกลับกันพื้นที่เมืองได้มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากพื้นที่เกษตรกรรม ป่าไม้ และแหล่งน้ำเปลี่ยนสภาพไปเป็นพื้นที่สิ่งปลูกสร้าง แล้วกลายไปเป็นพื้นที่เมืองในที่สุด จากสัดส่วนข้อมูลพื้นที่เมือง ในช่วงปี ค.ศ. 2003-2008 เพิ่มขึ้น 476.05 เฮกแตร์ และในปี ค.ศ.2008-2016 เพิ่มขึ้น 565.62 เฮกแตร์ และยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Table 1)

Table 1 Land use change in study area at Vientiane, Lao PDR form the year 2003, 2008 and 2016

Land use	Area (Sq ha)			Change (Sq ha)	
	2003	2008	2016	2003-2008	2008-2016
1. Agriculture	1868.07	1556.71	1244.95	-311.36	-311.76
2. Forest	546.95	372.9	121.06	-174.05	-251.84
3. Water	539.64	442.15	362.91	-97.49	-79.24
4. Urban	1753.82	2229.87	2795.49	+476.05	+565.62

2. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยรายปี ช่วงปี ค.ศ. 2003-2016

จากข้อมูลทางด้านอุตุวิทยาใกล้ผิวดินที่สามารถวิเคราะห์ได้จากสถิติ พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 2003-2016 มีค่า 27.44 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดคือปี ค.ศ. 2008 เท่ากับ 26.54 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดคือปี ค.ศ. 2010 เท่ากับ 28.09 องศาเซลเซียส โดยจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 0.04 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.19 เปอร์เซ็นต์ (Table 2)

Table 2 Annual mean temperature change 2003-2016 at department meteorology and hydrology station, Vientiane capital, Lao PDR

Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Avg.
Average temperature	27.30	27.05	27.60	27.51	27.33	26.54	27.45	28.09	26.55	28.02	27.66	27.44	27.78	27.86	27.44
Change per year		-0.25	0.54	-0.08	-0.19	-0.79	0.91	0.64	-1.54	1.47	-0.36	-0.21	0.34	0.08	0.04
Percent		-0.91	2.01	-0.30	-0.68	-2.89	3.44	2.34	-5.49	5.53	-1.29	-0.76	1.23	0.28	0.19

จากข้อมูลทางด้านอุตุวิทยาใกล้ผิวดินที่สามารถวิเคราะห์ได้จากสถิติ พบว่าความเร็วลมเฉลี่ยรายปี จากปี ค.ศ. 2003-2016 พบว่า ความเร็วลมเฉลี่ยต่ำสุดในปี ค.ศ. 2008 ค่าเฉลี่ย 1.27 เมตรต่อวินาที และความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดในปี ค.ศ. 2010 ค่าเฉลี่ย 1.61 เมตรต่อวินาที ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 14 ปี มีค่า 1.45 เมตรต่อวินาที อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมลดลง 0.01 เมตรต่อวินาที คิดเป็นร้อยละ 0.84 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลความเร็วลมพบว่า มีแนมโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง (Table 3)

Table 3 Annual wind speed change 2003-2016 at department meteorology and hydrology station, Vientiane capital, Lao PDR

Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Avg.
Average wind speed	1.57	1.57	1.53	1.45	1.33	1.27	1.39	1.61	1.47	1.42	1.47	1.37	1.43	1.45	1.45
Change per year		0.00	-0.04	-0.08	-0.13	-0.06	0.12	0.22	-0.14	-0.05	0.05	-0.10	0.06	0.02	-0.01
Percent		-0.02	-2.30	-5.52	-9.64	-4.60	8.88	13.86	-9.82	-3.37	3.13	-7.15	4.12	1.56	-0.84

การลดลงของขนาดความถี่ของความเร็วลม ส่งผลให้ไม่สามารถหอบความร้อนในพื้นที่เมืองนำออกไปสู่พื้นที่อื่นได้ (Table 4)

Table 4 Wind speed of frequency count in Vientiane, Lao PDR during the year 2003, 2008 and 2016

Wind speed	2003		2008		2016	
(m/s)	%	frequency	%	frequency	%	frequency
0.5 - 2.1	85.16	3,845	96.16	8,088	92.03	6,447
2.1 - 3.6	10.79	487	3.14	166	25.35	361
3.6 - 5.7	3.39	153	0.53	28	2.15	151
5.7 - 8.8	0.48	22	0.13	7	0.17	12
8.8 - 11.1	0.04	1	0.02	1	0.04	3
> 11.1	0.13	6	0.02	1	0.04	3

3. ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินกับอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน

3.1) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เมือง ปี ค.ศ. 2003-2016 กับ อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี ปี ค.ศ. 2003-2016 พบว่า R^2 มีค่าเท่า 0.122 การเพิ่มขึ้นของพื้นที่เมืองกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ มีความสัมพันธ์ไปทางเดียวกัน เนื่องจากพื้นที่เมืองมีการเพิ่มขึ้นและขยายออกไปทุกทิศทางและส่วนประกอบมาจากวัสดุซีเมนส์ พื้นคอนกรีตแล้วส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (กรมอุตุนิยม, 2552) ผลจากการที่ความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการไหลลงดินลดลง (Heat to ground) และการนำความร้อนไปใช้ในการระเหยได้น้อย ทำให้ส่วนการนำความร้อนไปใช้ในการเผาผลาญอากาศมีเพิ่มขึ้น (Sensible heat) (เกษม, 2522) แล้วส่งผลให้อุณหภูมิในอากาศเพิ่มขึ้นตามและมีแนวโน้มสูงขึ้นไปอย่างต่อเนื่องตามการวิเคราะห์จากสถิติข้อมูลที่ผ่านมา (Figure 3)

3.2) แนวโน้มของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี ค.ศ. 2003-2016

การเพิ่มขึ้นของพื้นที่เมืองและการลดลงของพื้นที่เกษตรกรรม เป็นความสัมพันธ์แบบตรงกันข้าม เนื่องจากสัดส่วนของพืชในพื้นที่เกษตรกรรมได้ลดลง ทำให้การระเหยกลายเป็นไอของพืชลดลง (Latent heat, LE) และปริมาณความร้อนในการเผาผลาญอากาศเพิ่มสูงขึ้น (Sensible heat flux, H) ตามกระบวนการสมดุลพลังงาน ทำให้สัดส่วนค่าของโบรเวน (Bowen ratio) ที่เพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของพื้นที่เมือง ตามสมการ β = H/LE (อลงกร, 2557) (Figure 4)

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับพื้นที่ป่าไม้ที่ลดลง ไปตามกระบวนการ “Cooling effect” เมื่อพื้นที่ป่าไม้ลดลง หรือการลดลงของพื้นที่สีเขียว จะส่งผลทำให้อุณหภูมิในเมืองเพิ่มขึ้น โดยพื้นที่สีเขียวจะทำให้อุณหภูมิในอากาศเพิ่มขึ้นและแผ่กระจายไปทุกๆพื้นที่ที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้พื้นที่เมืองที่มีระดับอุณหภูมิอากาศสูงมีการสะสมในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นความสัมพันธ์แบบตรงกันข้ามกัน ถ้าพื้นที่ป่าลดลงแนวโน้มของอุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนค่าของโบรเวน (Bowen ratio) ที่เพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของพื้นที่เมือง ตามสมการ β = H/LE (ปิยพง, 2544) (Figure 5)

การเพิ่มขึ้นของพื้นที่เมืองกับความเร็วลมที่ลดลง เนื่องจากขนาดความเร็วลม 2.1 - 3.6, 3.6 - 5.7, 5.7 - 8.8, 8.8 - 11.1 และมากกว่า 11.1 เมตรต่อวินาที มีจำนวนลดลง ทำให้ความเร็วลมที่ผ่านเข้ามาไม่สามารถหอบเอาความร้อนที่สะสมในพื้นที่เมืองออกไปสู่พื้นที่อื่นได้ (Figure 6)

.

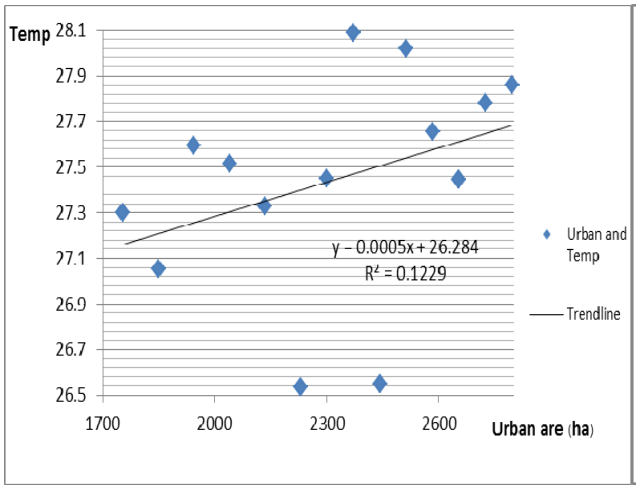


Figure 3 The correlative between temperature and annual mean urban area

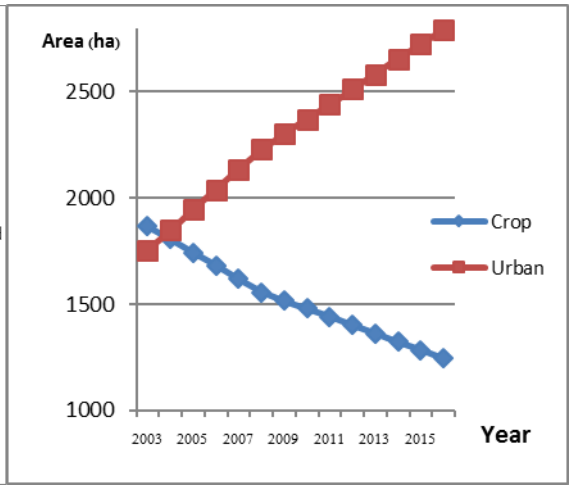


Figure 4 The relation of urban areas with agricultural areas

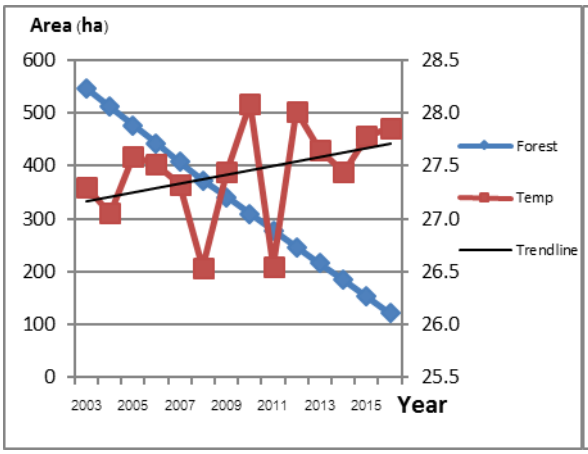


Figure 5 The relation of Temperature with forest area

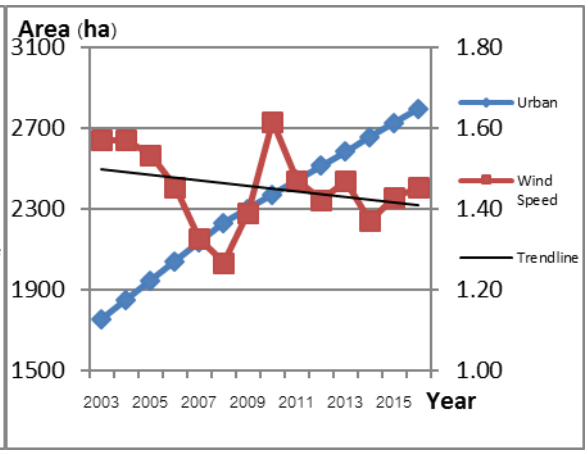


Figure 6 The relation of urban area with wind speed

สรุป

การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงต่อปัจจัยของอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน คือ อุณหภูมิเฉลี่ยรายปีและความเร็วลมเฉลี่ย โดยอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.014 เปอร์เซ็นต์ต่อปีและความเร็วกระแสลมเฉลี่ยลดลง 0.06 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ซึ่งสามารถนำข้อมูลนำมาหาสัดส่วนต่าง ๆ ของสิ่งปกคลุมดินของแต่ละช่วงปีได้ ว่ามีการเพิ่มขึ้น-ลดลงเท่าไร พบว่า พื้นที่การเกษตรกรรม ป่า และแหล่งน้ำมีความสัมพันธ์ผกผันกับอุณหภูมิ พื้นที่เมืองมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิ และพื้นที่เมืองมีความสัมพันธ์ผกผันกับความเร็วลม เราสามารถอธิบายจากการวิเคราะห์ได้ว่า ความถี่ของความเร็วลมระดับกลางและสูงจะมีแนวโน้มความเร็วลดต่ำลง ทำให้ไม่สามารถหอบความร้อน (อุณหภูมิ) ที่เกิดขึ้นในพื้นที่เมืองออกไปสู่พื้นที่อื่นได้ เนื่องจากความขรุขระ ความหนาแน่นของพื้นผิวเพิ่มขึ้น (Surface roughness) กระแสอากาศไหลผ่านมาปะทะความขรุขระ ความหนาแน่นทำให้มวลอากาศแตกตัวกระจายออกไปและทำให้ความเร็วลมค่อยๆ ลดลงแล้วกลายเป็นลมที่สงบถี่ขึ้น ไม่สามารถพาความร้อนในพื้นที่เมืองออกไปได้.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ให้ทุนสำหรับการเรียนและสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ Thailand International Cooperation Agency (TICA) ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุรัตน์ บัวเลิศ ที่ให้คำชี้แนะและคำปรึกษาในการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของโครงการติดตามลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดินและมลสารทางอากาศ มหาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) ที่สนองข้อมูลด้านเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านคุณภาพอากาศ ขอขอบพระคุณข้อมูลด้านอุตุวิทยาจาก National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) และข้อมูลด้านอุตุวิทยาจากกรมอุตุวิทยาและอุทกวิทยาของ สปป.ลาว และขอขอบคุณกรมพัฒนาที่ดิน ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ในพื้นที่ศึกษาในครั้งนี้.

เอกสารอ้างอิง

กรมอตุนิยมวิทยา. 2552. **การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต**. ศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา, กรุงเทพ. (อัดสำเนา)

เกษม จันทร์แก้ว. 2522. **การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินป่าดิบเขา ดอยปุย เชียงใหม่**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

ปิยพง องดีนอก. 2544. **การประเมินค่าการคายระเหยน้ำโดยวิธี Bowen ratio ในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินหลายรูปแบบของจังหวัดสุโขทัย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พรวิลัย. 2009. **บทสรุปสภาพอากาศทั่วประเทศของ สปป.ลาว ในรอบ 5 ปี**. กรมอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยา สปป.ลาว เวียงจันทร์.

อลงกรณ์ อินทรักษา. 2557. **บทบาทของความร้อนน้ำระเหย และความร้อนในการเผาผลาญอากาศต่อกับการกำหนดเขตการออกแบบ และการวางผังเมือง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาเอก ภาควิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม**, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Miller, R.W. 1997. **Urban forest: Planning and managing urban green spaces.** 2nd ed. Prentice-Hall, New Jessey.

การบำบัดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจากสายธารอากาศโดยระบบถังกรองชีวภาพแบบตัวกลางแผ่นใยขัด

Treatment of Volatile Organic Acids from Air Stream via Scouring Pad-Biofiltration System

ปิยาภรณ์ สมสมัคร[1*] ปานยจิตต์ พลับใจบุญ[1] ธราธร คูหา[1] และ ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร[1]

Piyapawn Somsamak[1*], Panyajit Plubjaiboon[1] Tharthorn Kooha[1] and Prapaipid Chairattanamanokorn[1]

บทคัดย่อ

กรดอินทรีย์ระเหยง่าย 3 ชนิดที่มักพบในการอบแห้งยางพารา ได้แก่ กรดอะซิติก โพรพิโอนิกและบิวทิริก ถูกป้อนสู่ถังกรองชีวภาพแบบใช้แผ่นใยขัดเป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะและเจริญเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นและระยะเวลากักเก็บอากาศ (Empty Bed Contact Time, EBCT) ต่อการบำบัด การทดลองพบว่า ถังกรองชีวภาพสามารถกำจัดกรดอะซิติกได้ดีกว่ากรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริกเมื่อได้รับสายธารอากาศที่มีความเข้มข้นกรดเท่ากัน เมื่อป้อนกรดกรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.1 ถึง 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ EBCT 2 นาที ถังกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพกำจัดได้ถึงร้อยละ 90 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดกรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร อยู่ในช่วงร้อยละ 30-50 และ ร้อยละ 15-30 ตามลำดับ การลดค่า EBCT ให้ต่ำกว่า 2 นาทีทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดกรดสองชนิดนี้ลดลงอีก ส่วนถังกรองชีวภาพที่ได้รับกรดอะซิติกยังสามารถทำงานได้ดีที่ EBCT 1 นาที นอกจากนี้ระบบถังกรองชีวภาพสามารถบำบัดสายธารอากาศปนเปื้อนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายผสม 3 ชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อการดำเนินงานของภาคอุตสาหกรรม

ABSTRACT

Three volatile organic acids commonly found in rubber heat-treatment process namely acetic, propionic and butyric acid were individually fed to biofiltration system using scouring pad as media for microbial attachment and proliferation. The effects of initial gas-phase concentrations and Empty Bed Contact Time (EBCT) on biofilters' performances were investigated. Upon conditions tested, higher overall acetic acid removal efficiency was demonstrated. At 2-min EBCT, biofilter maintained 90% removal efficiency upon being fed with 0.1 to 0.3 g/m^3 acetic acid. On the hand, at 0.3 g/m^3, propionic-fed and butyric-fed biofilters exhibited only 30-50% and 15-30% removal efficiency, respectively. The performances of these two biofilters decreased drastically when EBCT less than 2 min was applied, while the effect on acetic-fed biofilter was minimal at 1-min EBCT. Moreover, the biofilter treated air stream contaminated with mixture of acids effectively and responded accordingly to industry operation scheme.

Key Words: biofilter, rubber, volatile organic compounds

[*]Corresponding author, e-mail: fscipys@ku.ac.th

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัญหากลิ่นที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการอบแห้งยางพาราอาจส่งผลต่อสุขภาพของผู้ที่ทำงานในพื้นที่และต่อชุมชนโดยรอบ การกำจัดกลิ่นเป็นเรื่องยากเนื่องจากตัวกลางของกลิ่นคืออากาศซึ่งสามารถแพร่กระจายได้ง่าย กลิ่นเกิดจากสารเคมีที่ปนเปื้อนในอากาศ Hoven *et al.* (2004) พบว่ากรดอินทรีย์ระเหยเป็นองค์ประกอบหลักในไอจากกระบวนการอบแห้งยางพารา โดยมีกรดอะซิติกเป็นสารปนเปื้อนหลัก รองลงมาได้แก่กรดโพรพิโอนิกและบิวทิริก มีกรดวาเลริกปนเปื้อนอยู่ในปริมาณต่ำ เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารกลุ่มที่สามารถถูกย่อยย่อยสลายทางชีวภาพได้การบำบัดสายธารแก๊สที่ปนเปื้อนด้วยกรดอินทรีย์ระเหยง่ายโดยใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายจึงเป็นแนว ทางหนึ่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเสียค่าใช้จ่ายน้อย การบำบัดสายธารอากาศที่ปนเปื้อนด้วยมลสารอินทรีย์ทำได้โดยการให้สายธารแก๊สผ่านตัวกลางที่มีจุลินทรีย์เจริญอยู่ ตัวกลางที่นิยมใช้ ได้แก่ คอมโพสต์ พีท พลาสติก โฟม หรือเซรามิก ในวิธีนี้จุลินทรีย์เปลี่ยนรูปสารมลพิษอินทรีย์ให้เป็นสารที่เป็นอันตรายน้อยกว่า ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมวลจุลินทรีย์ มลสารในสายธารอากาศที่มีการรายงานว่าสามารถบำบัดด้วยระบบกรองชีวภาพเช่น โทลูอีน (Maestre *et al*., 2007) แอมโมเนีย (Taghipour *et al*., 2008) แอมโมเนียและกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Pagans *et al*., 2007) ไตรเมธิลเอมีน (Ying *et al*.,2008) เป็นต้น

การศึกษานี้ใช้จุลินทรีย์เริ่มต้นจากคอมโพสต์ที่เป็นตัวกลางในระบบถังกรองชีวภาพที่บำบัดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในสายธารอากาศอย่างมีประสิทธิภาพเป็นระยะเวลากว่าหนึ่งปี จากการดำเนินงานคอมโพสต์เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วและมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่สามารถใช้งานต่อได้ภายในระยะเวลาไม่นาน จึงจำเป็นต้องปรับสภาพและบรรจุคอมโพสต์ใหม่ ทำให้ไม่สะดวกในการประยุกต์ในภาคอุตสาหกรม ผู้ศึกษาเคลื่อนย้ายจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพจากคอมโพสต์สู่ตัวกลางแผ่นใยขัดทางการค้า ซึ่งน้ำหนักเบาและมีพื้นที่ผิวมาก จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดกรดอะซิติก โพรพิโอนิก และบิวทิริก ได้แก่ ระยะเวลาเก็บกัก (EBCT) และความเข้มข้นเริ่มต้น นอกจากนี้ยังศึกษาประสิทธิภาพเมื่อมีการหยุดระบบให้สอดคล้องกับการดำเนินงานจริงของอุตสาหกรรม

อุปกรณ์และวิธีการ

ระบบถังกรองชีวภาพ

ถังกรองทำด้วยวัสดุอะคลิลิกทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร ความสูง 35 เซนติเมตร ต่อกัน 4 ชั้น มีท่อสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊สที่ระดับความสูงต่าง ๆ ผ่านสายธารแก๊สจากด้านล่างสู่ด้านบน บรรจุตัวกลางแผ่นใยขัดที่มีจุลินทรีย์ยึดเกาะ ด้านล่างสุดมีลักษณะเป็นกรวยเพื่อรองรับและระบายของเหลวส่วนเกินออกจากระบบ ด้านบนมีช่องเปิดเพื่อให้ความชื้นและธาตุอาหารด้วยวิธีการสเปรย์ในเวลาที่ต้องการ ดังแสดงใน Figure 1

การเตรียมตัวกลางแผ่นใยขัด

จุลินทรีย์เริ่มต้นได้จากคอมโพสต์ที่เป็นตัวกลางในระบบถังกรองชีวภาพที่บำบัดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในสายธารอากาศอย่างมีประสิทธิภาพเป็นระยะเวลานานซึ่งเก็บไว้ในตู้เย็น 4 องศาเซลเซียส ผสมคอมโพสต์กับน้ำในอัตราส่วน 20% (w/v) กวนให้เข้ากันดีเป็นเวลา 30 นาที กรองเอาส่วนที่เป็นของแข็งออก เติมแร่ธาตุและธาตุอาหารจุลินทรีย์ เติมกรดอินทรีย์ระเหย 3 ชนิด ได้แก่กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริกเข้าสู่ระบบเพื่อ

เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานโดยเริ่มต้นที่ความเข้มข้นต่ำ ตัดแผ่นใยขัดทางการค้าให้มีขนาด 1.5 x1.5 ซม. แช่ตัวกลางแผ่นใยขัดไว้เป็นเวลา 15 วัน เพื่อให้จุลินทรีย์ในคอมโพสต์ยึดเกาะและเจริญเป็นฟิล์มชีวภาพบนตัวกลางแผ่นใยขัดโดยอาศัยกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสับสเตรท ระหว่างนี้มีการให้อากาศตลอดระยะเวลา เมื่อครบเวลา นำตัวกลางขึ้นมาผึ่งเพื่อกำจัดของเหลวอิสระ จากนั้นจึงบรรจุตัวกลางลงถังพลาสติกขนาดใหญ่ที่มีรูระบายอากาศ สเปรย์น้ำคอมโพสต์ผสมกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อเนื่องอีก 30 วัน บรรจุตัวกลางลงในถังกรองชีวภาพเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัด

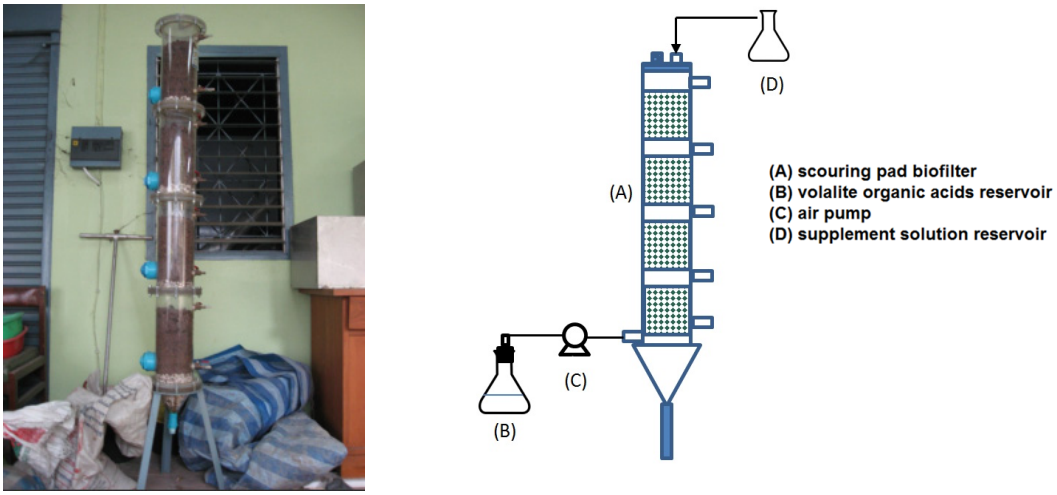


Figure 1 A compost-based biofilter used as inoculum (left) and schematic diagram of biofilter apparatus (right)

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

การศึกษานี้ดำเนินการในถังกรองชีวภาพ 3 ถัง แต่ละถังรับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพียง 1 ชนิด โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ช่วงหลักคือ ช่วงแรกศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นเวลา 148 วัน แบ่งสภาวะการดำเนินการเป็น 5 ระยะย่อย ในช่วงความเข้มข้นกรดอะซิติก โพรพิโอนิก และบิวทิริกในสายธารอากาศ 0.1 ถึง 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร EBCT 2 นาที (ยกเว้นช่วง 1I) ภาระบรรทุกของระบบ 2.4 ถึง 9.0 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำการเปลี่ยนตัวกลางใหม่ก่อนเริ่มการศึกษาที่ 2 ซึ่งดำเนินการเป็นเวลา 128 วัน กำหนดความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในสายธารอากาศ 0.1 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร แบ่งการทดลองเป็น 4 ระยะย่อย ที่ EBCT 2.5 นาที 2 นาที 1 นาที และ 0.5 นาที โดยเพิ่มอัตราการไหลเข้าของสายธารอากาศ การออกแบบการทดลองได้สรุปไว้ใน Table 1

เก็บตัวอย่างสายธารแก๊สที่ผ่านออกจากถังกองชีวภาพเพื่อติดตามประสิทธิภาพการบำบัดของถังกรองชีวภาพโดยใช้ปั๊มดูดตัวอย่างสายธารอากาศจากท่อเก็บตัวอย่างในชั้นต่าง ๆ นำสายธารอากาศผ่านหลอดดูดซับ (SKC 226-01, Anasorb CSC) ในอัตราที่กำหนดจนได้ปริมาตรอากาศตามต้องการ ทั้งนี้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายจากสายธารอากาศจะถูกดูดซับบนตัวกลางในหลอดดูดซับ ทำการชะกรดอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากหลอดดูดซับด้วยน้ำกลั่นที่ทราบปริมาตร นำตัวอย่าง 1 ไมโครลิตร ฉีดเข้าเครื่อง GC/FID เทียบความเข้มข้นกับสารละลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมาตรฐาน ในวันที่มีการเปลี่ยนสภาวะการทดลองจะเก็บตัวอย่างสายธารอากาศหลังจากเปลี่ยนสภาวะแล้ว 6 ชั่วโมง

Table 1 Summary of bioflter contaminant loading conditions for single acid experiments

stage	Empty bed contact time (min)	Gas phase concentration (g/m^3)	mass loading ($g/m^3/hr$)	Duration (day)
Experiment 1				
I	2.5	0.1	2.4	1-13
II	2	0.1	3.0	14-48
III	2	0.2	6	49-77
IV	2	0.25	7.5	78-123
V	2	0.3	9	124-148
Experiment 2				
2-I	2.5	0.1	2.4	1-11
2-II	2	0.1	3	12-48
2-III	1	0.1	6	49-87
2-IV	0.5	0.1	12	88-128

การศึกษาประสิทธิภาพเมื่อดำเนินการระบบสอดคล้องกับการทำงานของภาคอุตสาหกรรม

การศึกษานี้ดำเนินการในถังกรองชีวภาพ 1 ถัง ใช้ตัวกลางจากถังกรองชีวภาพที่ใช้ในศึกษากรดชนิดเดียวในการทดลองที่ผ่านมาทั้ง 3 ถังมาผสมในอัตราส่วนเท่ากัน ป้อนสายธารอากาศจากการอบยางพาราสังเคราะห์โดยใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายทั้ง 3 ชนิด ความเข้มข้นกรดอะซิติก โพรพิโอนิก และบิวทิริกในสายธารอากาศ 0.1 , 0.05 และ 0.05 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ EBCT 2 นาที ศึกษาต่อเนื่องเป็นเวลา 120 วัน โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 ช่วงหลักคือ ช่วงที่ 1 ถังกรองชีวภาพรับสายธารอากาศปนเปื้อนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งสายชนิดในเวลากลางวัน ตั้งแต่เวลา 8.00 น.-17.00 น. เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากนั้นเข้าสู่ช่วงที่ 2 โดยได้รับสายธารอากาศวันละ 9 ชั่วโมง ต่อเนื่อง 5 วัน หยุด 2 วันตามเวลาการการทำงานจริง ช่วงที่ 3 หยุดการผ่านสายธารอากาศเข้าระบบเป็นเวลา 10 วัน เพื่อจำลองสถานการณ์ที่โรงงานปิดในวันหยุดตามเทศกาลหรือหยุดเพื่อการซ่อมบำรุง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เมื่อทำการศึกษาผลของความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าระบบและอัตราการไหลของสายธารอากาศเข้าระบบถังกรองชีวภาพที่ใช้จุลินทรีย์ตรึงบนตัวกลางแผ่นใยขัด พบว่าทั้งสองปัจจัยล้วนมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดกรดอินทรีย์ระเหยง่าย การเริ่มระบบสำหรับการศึกษาที่ 1 ใช้เวลา 13 วัน กำหนด EBCT 2.5 นาที เริ่มใช้ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดในสายธารอากาศที่เข้าในแต่ละถัง 0.1 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร หลังจากนั้นลด EBCT ลงเป็น 2 นาทีในระยะแรกนี้จุลินทรีย์จะปรับตัวเข้ากับสภาวะที่ใช้ทดลอง เป็นที่น่าสังเกตว่าระบบถังกรองชีวภาพตอบสนองต่อกรดอะซิติกได้ทันทีและมีประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและแสดงประสิทธิภาพการบำบัดในระดับสูงตลอดระยะเวลา 148 วันของการทดลอง (Figure 2)

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรด กรดอะซิติก จาก 0.1 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 0.2 0.25 และ 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในวันที่ 49 78 และ 124 ของการทดลองตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกลดลงในวันแรกแต่ก็สามารถฟื้นคืนประสิทธิภาพการบำบัดในวันถัดไป ถังกรองชีวภาพนี้รับกรดอะซิติก 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อเนื่องเป็นเวลา 24 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 95 ตลอดการทดลอง

หลังจากเริ่มระบบ จุลินทรีย์ในถังกรองชีวภาพที่รองรับสายธารอากาศที่ปนเปื้อนกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริกมีการปรับตัวเห็นได้จากประสิทธิภาพการบำบัดที่ค่อยๆเพิ่มขึ้น (Figure 2) โดยในช่วง 75 วันแรก ถังกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดกรดทั้งสองชนิดใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ที่ความเข้มข้นกรด 0.1 และ 0.2 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ระยะ II และ III) ประสิทธิภาพการบำบัดแปรผันในช่วงร้อยละ 50-70 หากแต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดเป็น 0.25 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ระยะ IV) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดกรดบิวทิริกลดลงจนเหลือเพียงร้อยละ 30-50 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ระยะ V) ประสิทธิภาพการบำบัดกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริกลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะถังกรองชีวภาพที่บำบัดกรดบิวทิริกมีประสิทธิภาพเหลือเพียงร้อยละ 15-30 เท่านั้น

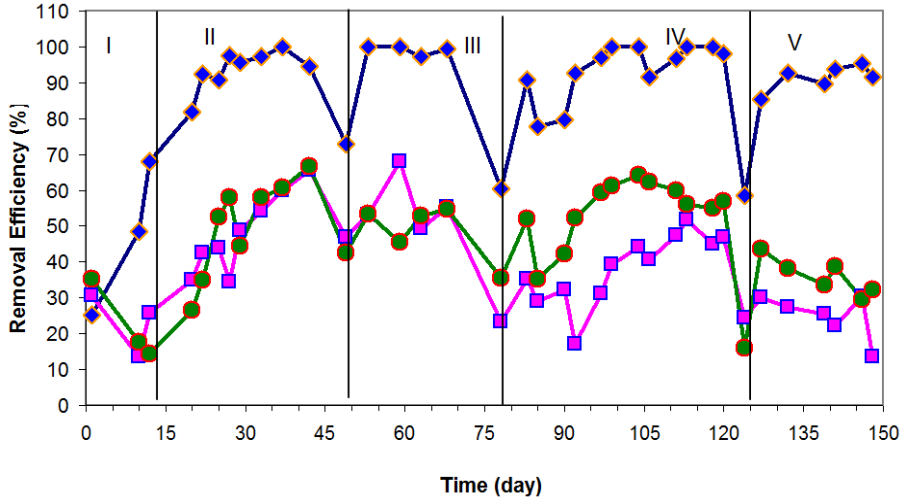


Figure 2 Removal efficiency at different influent acid concentrations: stage II 0.1 g/m^3, stage III 0.2 g/m^3, stage IV 0.25 g/m^3, stage V 0.3 g/m^3. Stage I was a start up period. The volatile organic acids are acetic acid (diamond), propionic acid (circle), butyric acid (square). EBCT 2 min.

การลด EBCT มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดกรดอินทรีย์ในสายธารอากาศของระบบถังกรองชีวภาพลดลง โดยหลังจากเริ่มระบบ 11 วัน เริ่มทำการทดลองโดยเพิ่มอัตราการไหลเข้าระบบของสายธารอากาศปนเปื้อน ส่งผลให้ค่า EBCT ลดลงจาก 2.5 นาที เหลือ 2.0 นาที (ระยะ 2-II) กำหนดให้ความเข้มข้นกรดแต่ละชนิดเข้าระบบมีค่าคงที่ 0.1 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในช่วงแรกถังกรองชีวภาพแต่ละถังมีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยประสิทธิภาพการกำจัดกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริกในสภาวะคงที่ (steady state) มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 94 68 และ 46 ตามลำดับ (Figure 3) เมื่อลด EBCT เหลือ 1 นาที (ระยะ 2-III) ประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกมีเฉลี่ยร้อยละ 90 ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยในการทดลองที่ 1-III ที่ถังกรองชีวภาพมีค่า EBCT 2.0 นาทีแต่มีภาระบรรทุก 6 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงเท่ากัน อย่างไรก็ตามเมื่อลดค่า EBCT

เหลือ 0.5 นาที ถังกรองชีวภาพไม่สามารถฟื้นคืนได้ในทันที (ระยะ 2-IV) ในเวลา 40 วันหลังจากลด EBCT เหลือ 0.5 นาที ถังกรองชีวภาพนี้สามารถบำบัดกรดอะซิติกได้เพียงร้อยละ 60 เท่านั้น การลดค่า EBCT เหลือน้อยกว่า 2 นาทีส่งผลทางลบอย่างรุนแรงต่อประสิทธิภาพการบำบัดกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริก ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดกรดโพรพิโอนิกลดลง จากช่วงร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 30 และร้อยละ 20 ที่ EBCT 2 นาที 1 นาที และ 0.5 นาที ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดกรดบิวทิริกลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 20 โดยคาดว่าในสภาวะนี้การดูดซับเป็นหนึ่งในกลไกหลักในการกำจัดนอกเหนือจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

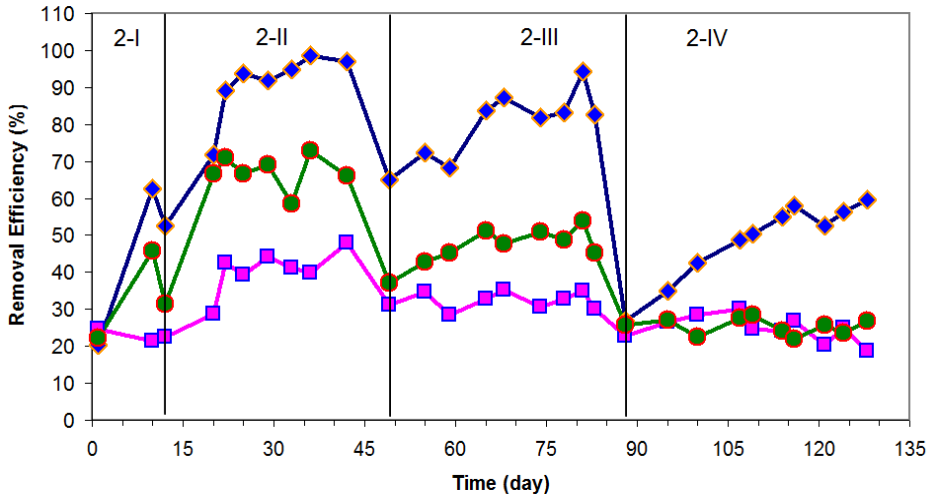


Figure 3 Removal efficiency at different EBCT: stage II 2 min, stage III 1 min, stage IV 0.5 min. Stage I was a start up period. The volatile organic acids are acetic acid (diamond), propionic acid (circle), butyric acid (square). Gas phase concentration 0.1 g/m^3.

ในภาพรวมถังกรองชีวภาพที่มีภาระบรรทุกสูงกว่า 7.5 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง (Figure 4) ทั้งนี้การเพิ่มอัตราการไหลเข้าของสายธารอากาศทำให้ค่า EBCT ลดลง ซึ่งเป็นการลดระยะเวลาสัมผัสระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศกับฟิล์มน้ำที่เคลือบผิวตัวกลาง และลดระยะเวลาสัมผัสระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ละลายในฟิล์มน้ำกับจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นกลไกหลักที่ทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ ในทุกสภาวะที่ศึกษาถังกรองชีวภาพจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดกรดอะซิติกได้ดีกว่ากรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริก ทั้งนี้กรดอะซิติกมีโมเลกุลขนาดเล็กจุลินทรีย์สามารถสลายและนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ส่งผลให้จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนมากขึ้นและเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายให้เร็วขึ้นตามไปด้วย ส่วนกรดโพรพิโอนิกและบิวทิริกที่ต้องสลายตามลำดับขั้น นอกจากนี้การที่กรดทั้งสองชนิดสลายยากกว่าทำให้จุลินทรีย์ได้รับอาหารน้อยจึงเติบโตช้า อย่างก็ตามควรทำการศึกษาประเด็นนี้อย่างละเอียดต่อไป

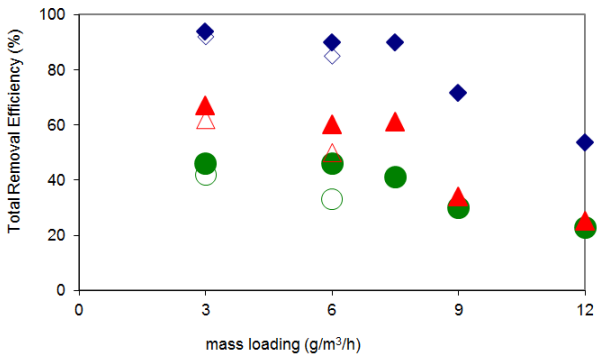


Figure 4 Removal efficiency as the function of mass loading rate. The volatile organic acids are acetic acid (diamond), propionic acid (circle), butyric acid (square).

การจำลองการดำเนินงานของภาคอุตสาหกรรม

กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ใช้องค์ประกอบในสายธารอากาศจากกระบวนการอบแห้งยางพาราเป็นต้นแบบในการสังเคราะห์ เมื่อนำกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งสามชนิดป้อนเข้าสู่ถังกรองชีวภาพที่มีแผ่นใยขัดเป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะเพื่อบำบัดสายธารอากาศจำลอง พบว่า ระบบถังกรองชีวภาพสามารถบำบัดสายธารอากาศปนเปื้อนกรดอินทรีย์ผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อการดำเนินงานของอุตสาหกรรมโดยสามารถฟื้นคืนได้หลังจากการทดลองหยุดระบบในช่วงกลางคืน การทดลองหยุดระบบในช่วงกลางคืนวันทำงาน 5 วันและเสาร์อาทิตย์ 2 วัน อย่างไรก็ตามหลังจากการหยุดดำเนินการระบบเป็นเวลา10 วัน ถังกรองชีวภาพจะค่อยๆใช้เวลาฟื้นตัว โดยสามารถฟื้นคืนประสิทธิภาพการบำบัดกรดอะซิติกร้อยละ 90 ในเวลา 10 วัน ส่วนการฟื้นคืนประสิทธิภาพการบำบัดกรดโพรพิโอนิคและบิวทิริกจะเกิดขึ้นได้ช้ากว่า ชี้ให้เห็นว่าการกำจัดกรดทั้งสองชนิดมีกลไกที่แตกต่างจากการบำบัดกรดอะซิติก ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากจุลินทรีย์หลักที่ทำหน้าที่ย่อยสลายกรดทั้งสามชนิดนั้นเป็นจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน

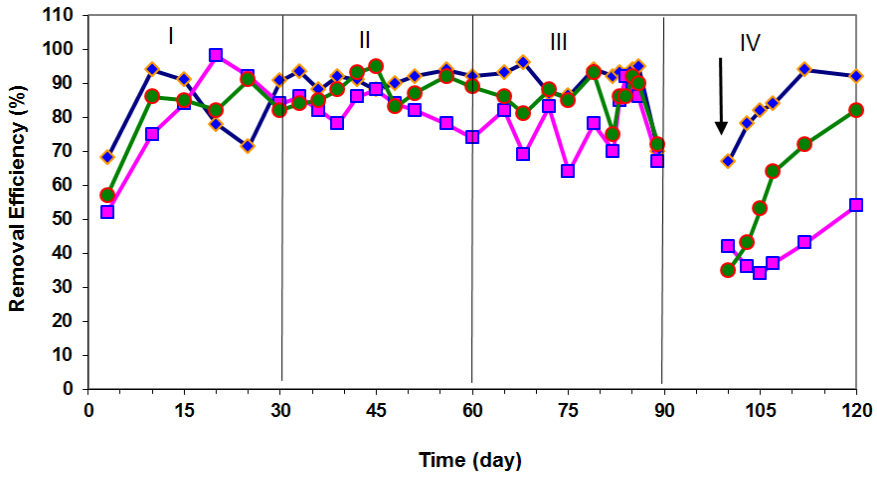


Figure 5 VOCs removal efficiency at intermittently loaded biofilter with VOC mixture: stage II 9-hr loading period, stage III 9-hr loading period following a weekend shutdown, stage IV 8-hr loading period following a 10-day shutdown. Stage I was a start up period. The VOCs are acetic acid (diamond), propionic acid (circle), butyric acid (square).

สรุป

ถังกรองชีวภาพแบบใช้แผ่นใยขัดเป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสายธารอากาศปนเปื้อนกรดอินทรีย์ระเหยง่าย มีความเสถียรทางกายภาพ สามารถทำงานต่อเนื่องได้มากกว่า 260 วัน จึงแก้ปัญหาการยุบตัวและย่อยสลายตัวกลางที่เกิดขึ้นในถังกรองชีวภาพแบบคอมโพสต์เดิมได้ แม้ว่าถังกรองชีวภาพจะสามารถกำจัดกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริกได้น้อยกว่ากรดอะซิติก หากเมื่อทดสอบกับสายธารอากาศสังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นระดับที่พบได้จากการอบยางพารา ระบบกรองชีวภาพก็สามารถบำบัดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถฟื้นตัวภายหลังการหยุดระบบตามการปฏิบัติงานจริงของอุตสาหกรรมได้ ถังกรองชีวภาพแบบใช้แผ่นใยขัดนี้จึงมีศักยภาพในการใช้งานจริงในการบำบัดสายธารอากาศปนเปื้อนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจากอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการทดลองเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

Hoven, V.P., Rattanakarun, K., and Y. Tanaka. 2004. Reduction of offensive odor from natural rubber by odor-reducing substances. **Journal of Applied Polymer Science** 92: 2253-2260.

Maestre, J.P., X. Gamisans, D. Gabriel and J. Lafuente. 2007. Fungal biofilters for toluene biofiltration: Evaluation of the performance with four packing materials under different operating conditions. **Chemosphere** 67: 684 – 692.

Pagans, E., X. Font and A. Sanches. 2007. Coupling composting and biofiltration for ammonia and volatile organic compound removal. **Biosystems Engineering** 97: 491 – 500.

Taghipour, H., M.R. Shahmansoury, B. Bina and H. Movahdian. 2008. Operationl parameters in biofiltration of ammonia-contaminated air streams using compost-pieces of hard plastics filter media. **Chemical Engineering Journal** 137: 198 – 204.

Ying, D., W. Weixiang, H. Zhiying and C. Yingxu. 2008. Correlation of reactor performance and bacterial community composition during the removal of trimethylamine in three-stage biofilters. **Biochemical Engineering Journal** 38: 248 – 258.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Subject: Natural Resources and Environment

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

การจัดการขยะอินทรีย์ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี

Organic Wastes Management of Pattawee Municipality Makham District Chanthaburi Province

เกียรติภูมิ จันเต[1*] และ สุนทรี จีนธรรม[2]

Kiattipoom Jantee[1*] and Soontaree Cheentam[2]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขั้นตอนและวิธีการการส่งเสริมให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมคัดแยกขยะอินทรีย์ที่ต้นทางและวิธีการจัดการขยะอินทรีย์ของเทศบาลตำบลปัถวี กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ผู้บริหารเทศบาลตำบลปัถวี จำนวน 2 คน สมาชิกสภาเทศบาลตำบลปัถวี จำนวน 4 คน ผู้ใหญ่บ้าน จำนวน 2 คน และเจ้าหน้าที่ จำนวน 2 คน รวมทั้งสิ้น 10 คน โดยเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้างและวิเคราะห์ข้อมูลแบบอุปนัย พบว่า ขั้นตอนและวิธีการการส่งเสริมให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมคัดแยกขยะอินทรีย์ที่ต้นทางเริ่มจาก 1) การออกคำสั่งแต่งตั้งคณะกรรมการ 2) การฝึกอบรมให้แก่ผู้เข้าร่วมโครงการและศึกษาดูงานพื้นที่ต้นแบบ 3) การประชาสัมพันธ์ 4) การคัดแยกขยะอินทรีย์ในชุมชน 5) การติดตามความก้าวหน้า 6) การรายงานผลการดำเนินงาน 7) การบรรจุโครงการในแผนพัฒนา 4 ปี ส่วนวิธีการจัดการขยะอินทรีย์ ได้แก่ การนำไปลี้ยงสัตว์ การทำปุ๋ยหมัก และปริมาณขยะอินทรีย์ลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มโครงการ 2.33 ตันต่อวัน เมื่อสิ้นสุดโครงการลดลงเหลือ 0.85 ตันต่อวัน

ABSTRACT

This study had the objective to study the process and the method of promoting people to participating in separating organic wastes and how to get rid of organic wastes of Pattawee Municipality, Makham district, Chanthaburi. The sample group was 2 executives of Pattawee municipality, 4 members of Pattawee subdistrict, 2 village heads and 2 officials which was the total of 10 peoples. This was done by Purposive sampling. The tools used in collecting the data were structural interview and analytic induction. It was found that the process and how to promote people to participate in separating organic wastes starting from 1)issuing the appointment order of committee 2)training to project participators and study the prototype area 3)public relation 4)separating organic wastes in community 5)monitoring of the progress 6)reporting of the work operation 7)filling the project in the 4 - years. Methods of management organic wastes were fed animals and fertilizer. Volume of organic waste decrease that project start point 2.33 tons per day and when end of project point 0.85 tons per day.

Key Words: Organic Wastes Management, Pattawee Municipality

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

[1]เทศบาลตำบลปัถวี จังหวัดจันทบุรี 22150

[1]Pattawee Municipality, Chanthaburi Province 22150

[2]คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี 13180

[2]Faculty of Public Health, Varaya Alongkorn Rajabhat University Under The Patronage Thailand 13180

คำนำ

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันปัญหาขยะมูลฝอยเป็นปัญหาสำคัญที่อยู่คู่กับประเทศไทยมายาวนานและนับวัน ยิ่งมีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะมูลฝอยทุกปีตามอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การขยายตัวทางเศรษฐกิจ และการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในการอุปโภคบริโภคของประชาชน ซึ่งในขณะเดียวกันปริมาณขยะมูลฝอยที่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้องเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำ แม้ว่าองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการบริหารจัดการขยะมูลฝอย ทั้งการจัดเก็บ เคลื่อนย้าย รวมทั้งการทำลาย จะได้รับการจัดสรรงบประมาณในการก่อสร้างระบบกำจัดขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังไม่เพียงพอกับปริมาณขยะมูลฝอยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปีซึ่งในปี 2555 พบปริมาณขยะชุมชนมีมากถึงประมาณ 24.73 ล้านตัน ในจำนวนนี้สามารถกำจัดได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการประมาณ 5.83 ล้านตัน และถูกนำกลับไปใช้ประโยชน์ประมาณ 5.28 ล้านตัน ขยะมูลฝอยส่วนที่เหลือกว่า 13.62 ล้านตัน ยังคงถูกกำจัดทิ้งอย่างไม่ถูกหลักวิชาการด้วยวิธีการเทกองกลางแจ้ง และการเผาในที่โล่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2558)

ในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีขยะใหม่เกิดขึ้นกว่า 70,000 ตันต่อวัน หรือ 70 ล้านกิโลกรัมต่อวัน ส่วนขยะเก่าตกค้างอยู่เพิ่มขึ้นเป็น 30.83 ล้านตัน คาดว่า ในปี พ.ศ. 2560 จะสามารถกำจัดขยะเก่าทั่วประเทศได้ทั้งหมด สำหรับพื้นที่ไม่มีขยะสะสม 5 จังหวัด คือ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี สมุทรสงคราม แพร่ ภูเก็ต และพบว่ามี 5 จังหวัด มีขยะสะสมมากกว่า 1 ล้านตันขึ้นไป คือ ชลบุรี สมุทรปราการ สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช และสงขลา (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) คณะรักษาความสงบแห่งชาติ (คสช.) ได้เห็นชอบแผนที่แนวทาง (Roadmap) การจัดการขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย และแผนปฏิบัติการแก้ไขปัญหาในพื้นที่วิกฤตที่ต้องเร่งแก้ไขปัญหากำจัดขยะมูลฝอยไม่ถูกต้องและตกค้างสะสม เมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2557 และได้สั่งการให้ดำเนินการแก้ไขปัญหาขยะมูลฝอยทั้งในกรุงเทพมหานคร ส่วนกลาง ส่วนภูมิภาค และท้องถิ่น ในทุกมิติประกอบด้วย ที่ทิ้งขยะมูลฝอย การแยกขยะมูลฝอย การขนขยะมูลฝอย โรงงานกำจัดขยะมูลฝอย ฯลฯ โดยทันที โดยมีแนวทางปฏิบัติ 4 ขั้นตอน คือ 1) กำจัดขยะมูลฝอยตกค้างสะสมในสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยในพื้นที่วิกฤติ (ขยะมูลฝอยเก่า) 2) สร้างรูปแบบการจัดการขยะมูลฝอยและของเสียอันตรายที่เหมาะสม (ขยะมูลฝอยใหม่) เน้นการลดและคัดแยกขยะมูลฝอยตั้งแต่ต้นทาง จัดการขยะมูลฝอยแบบศูนย์รวมกำจัดโดยเทคโนโลยีแบบผสมผสานเน้นการแปรรูปเป็นพลังงานหรือทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด 3) วางระเบียบ มาตรการ การบริหารจัดการขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย และ 4) สร้างวินัยของคนในชาติมุ่งสู่การจัดการที่ยั่งยืนเน้นให้ความรู้ประชาชนและบังคับใช้กฎหมาย (กรมควบคุมมลพิษ, 2558)

มติคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติในคราวประชุม ครั้งที่ 3/2558 เมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 ได้มีมติเห็นชอบตามความเห็นของคณะกรรมการกองทุนสิ่งแวดล้อม ในการอนุมัติกรอบวงเงินอุดหนุน จำนวน 200,000,000 บาท (สองร้อยล้านบาทถ้วน) ให้แก่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น จำนวน 500 แห่ง ทั่วประเทศ เพื่อดำเนินโครงการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการคัดแยกขยะที่ต้นทาง (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2558)

เทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี มีปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น 4.30 ตันต่อวัน การเก็บรวบรวมขยะมูลฝอยภายในเขตพื้นที่ได้เฉลี่ยประมาณ 3.64 ตันต่อวัน มีขยะมูลฝอยตกค้างประมาณ 0.66 ตันต่อวัน แยกเป็นขยะอินทรีย์ 2.33 ตัน ขยะรีไซเคิล 1.09 ตัน ขยะอันตราย 0.11 ตัน และขยะทั่วไป 0.10 ตัน (กอง

สาธารณสุขและสิ่งแวดล้อม เทศบาลตำบลปัถวี, 2558) และได้จัดทำข้อเสนอโครงการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการคัดแยกขยะที่ต้นทาง เพื่อขอรับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนสิ่งแวดล้อม สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้รับการอนุมัติงบประมาณตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2558 ต่อมาได้ดำเนินกิจกรรมตามแผนงานโครงการดังกล่าวจนเสร็จสิ้นเมื่อเดือนเมษายน 2560 รวมระยะเวลา 18 เดือน จากข้อมูลรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการพบว่ามีปริมาณขยะในแต่ละวันมากที่สุดคือขยะอินทรีย์ 2.33 ตัน โดยเทศบาลตำบลปัถวีได้ส่งเสริมให้ประชาชนคัดแยกขยะอินทรีย์ตั้งแต่ต้นทางและนำไปจัดการด้วยวิธีต่าง ๆ ส่งผลให้ปริมาณขยะอินทรีย์ลดลงอย่างต่อเนื่องและมีการใช้ประโยชน์จากการจัดการขยะอินทรีย์อย่างครบวงจร ผู้วิจัยในฐานะผู้รับผิดชอบโครงการจึงได้วิจัยเรื่องการจัดการขยะอินทรีย์ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี เพื่อศึกษาขั้นตอนและวิธีการส่งเสริมให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมคัดแยกขยะอินทรีย์ที่ต้นทาง วิธีการจัดการขยะอินทรีย์ในพื้นที่ของเทศบาตำบลปัถวี พร้อมทั้งเสนอแนวทางการจัดการขยะอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินงานของส่วนราชการและองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นนำไปปรับใช้ในพื้นที่ของตนเองต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาการจัดการขยะอินทรีย์ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ (Quality research) ด้วยการสัมภาษณ์เชิงลึกและการศึกษาเอกสาร ดังนี้

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1.1 ประชากรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ผู้บริหารเทศบาลตำบลปัถวี จำนวน 5 คน สมาชิกสภาเทศบาลตำบลปัถวี จำนวน 11 คน ผู้ใหญ่บ้าน จำนวน 12 คน เจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบโครงการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการคัดแยกขยะที่ต้นทาง จำนวน 2 คน

1.2 กลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้กำหนดกลุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sample) ดังนี้ ผู้บริหารเทศบาลตำบลปัถวี จำนวน 2 คน สมาชิกสภาเทศบาลตำบลปัถวี จำนวน 4 คน ผู้ใหญ่บ้าน จำนวน 2 คน เจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบโครงการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการคัดแยกขยะที่ต้นทาง จำนวน 2 คน รวมทั้งสิ้น 10 คน

2. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง จำนวน 2 ข้อ เพื่อศึกษาขั้นตอนการส่งเสริมให้ประชาชนมีส่วนร่วมคัดแยกขยะอินทรีย์ที่ต้นทาง และวิธีการจัดการขยะอินทรีย์ในพื้นที่ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี และแบบบันทึกการศึกษาเอกสาร

3. วิธีการเก็บข้อมูล

3.1 การสัมภาษณ์เชิงลึกกลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยประสานงานเพื่อนัดหมายตามวันและเวลาที่กำหนดและดำเนินการสัมภาษณ์ด้วยตนเอง

3.2 การศึกษาเอกสารของโครงการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการคัดแยกขยะที่ต้นทาง และเอกสารอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์

4. การวิเคราะห์ข้อมูลโดยนำมาจัดระเบียบข้อมูลโดยจำแนกตามประเด็นการศึกษาให้ครบทุกองค์ประกอบที่ศึกษาและผู้วิจัยใช้วิธีวิเคราะห์แบบอุปนัย (Analytic induction) ซึ่งเป็นวิธีตีความสร้างข้อสรุปข้อมูลจากรูปธรรมหรือปรากฏการณ์ที่มองเห็น

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษา

การศึกษาการจัดการขยะอินทรีย์ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี พบว่า

1. ขั้นตอนและวิธีการการส่งเสริมให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมคัดแยกขยะอินทรีย์ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี มีขั้นตอนดังนี้

1) การออกคำสั่งแต่งตั้งคณะกรรมการโครงการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการคัดแยกขยะที่ต้นทาง มีคณะกรรมการรวม 15 คน มีบทบาทหน้าที่กำหนดหลักสูตรการฝึกอบรม การจัดหาวัสดุการฝึกอบรม ควบคุม กำกับ ดูแล การจัดกิจกรรมจามโครงการและพิจารณาผลการดำเนินงานก่อนรายงานให้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องทราบ

2) การฝึกอบรมโดยประกาศรับสมัครผู้เข้าร่วมโครงการและมีผู้สนใจสมัครเข้าร่วมจำนวน 70 คน การสร้างหลักสูตรการฝึกอบรมเรื่อง “การคัดแยกขยะที่ต้นทาง” ระยะเวลาการฝึกอบรม 1 วัน ประกอบด้วยหัวข้อสถานการณ์ขยะมูลฝอยในประเทศไทย การจัดการขยะมูลฝอยอินทรีย์ การคัดแยกขยะประจำบ้าน และการใช้ประโยชน์จากขยะมูลฝอย และการจัดทำคู่มือการฝึกอบรมพร้อมทั้งวัสดุอุปกรณ์การจัดการขยะอินทรีย์มอบให้กลุ่มเป้าหมายที่เข้ารับการฝึกอบรมนำไปใช้ประโยชน์ในระดับครัวเรือน ผลการฝึกอบรมพบว่า คะแนนก่อนการฝึกอบรมผ่านเกณฑ์ร้อยละ 35.2 คะแนนหลังการฝึกอบรมผ่านเกณฑ์ร้อยละ 100.00

3) การศึกษาดูงานพื้นที่ต้นแบบ ณ สำนักงานเทศบาลตำบลปากน้ำประแส อำเภอแกลง จังหวัดระยอง ผู้เข้าร่วมการศึกษาดูงานทั้งสิ้น 100 คน มีการนำเสนอผลการดำเนินงานเกี่ยวกับการจัดการขยะในระดับตำบลโดยกลุ่มคนรักปากน้ำประแส เริ่มจากการคัดแยกขยะในครัวเรือนของตนเอง ทุกชิ้น เช่น การนำถุงพลาสติกที่บรรจุอาหารล้างทำความสะอาดแล้วนำไปผึ่งแดดเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้ง ทำให้ปริมาณขยะลดลงและต่อมาคนในชุมชนจึงนำถังขยะมาคืนให้แก่เทศบาลตำบลปากน้ำประแสอีกทั้งการสร้างกระแสสังคมด้วยการรณรงค์เสียงตามสาย การเดินเคาะประตูบ้าน เป็นต้น

4) การจัดทำป้ายประชาสัมพันธ์ขนาดใหญ่ ติดตั้งบริเวณหน้าสำนักงานเทศบาลตำบลปัถวี จำนวน 1 ป้าย บริเวณหน้าโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลปัถวี จำนวน 1 ป้าย การจัดประกวดคำขวัญรณรงค์การคัดแยกขยะที่ต้นทางโดยนักเรียนระดับประถมศึกษาและมัธยมศึกษา จากนั้นนำคำขวัญที่ชนะเลิศแต่ละประเภทมาจัดทำป้ายประชาสัมพันธ์ติดประกาศไว้ที่โรงเรียนและชุมชน จำนวน 6 ป้าย ทั้งนี้ยังได้จัดทำสติ๊กเกอร์ประชาสัมพันธ์ปิดประกาศไว้ร้านค้าชุมชน สถานที่ราชการ วัด จำนวน 200 แผ่น การจัดทำแผ่นพับประชาสัมพันธ์แจกจ่ายประชาชนที่มารับบริการที่เทศบาลตำบลปัถวี และในโอกาสต่าง ๆ จำนวน 1,000 ฉบับ

5) การดำเนินการคัดแยกขยะอินทรีย์

5.1 ระดับครัวเรือน ประชาชนดำเนินการโดยการคัดแยกที่ต้นทางใส่ภาชนะที่มอบให้หลังจากเสร็จสิ้นการฝึกอบรม (ถังพลาสติกอย่างหนาขนาด 100 ลิตร พร้อมฝาปิด จำนวน 1 ใบ) ได้แก่ เศษอาหาร เศษผักและผลไม้ เศษวัสดุจากการเกษตร

5.2 ผู้ประกอบการโดยเฉพาะแผงจำหน่ายผลไม้ริมทาง ได้แก่ เศษอาหาร เศษผลไม้ (เปลือกและผลไม้ที่จำหน่ายไม่หมดและเน่าเสีย) โดยเทศบาลตำบลปัถวีได้จัดหาภาชนะรองรับไว้ให้เฉพาะและดำเนินการเก็บขนทุกวันจันทร์และวันพฤหัสบดีไปกองรวมไว้บริเวณลานด้านหลังเทศบาลตำบลปัถวี ปริมาณขยะเฉลี่ย 0.6 ตันต่อครั้ง เฉลี่ยต่อเดือน 4.8 ตัน

5.3 วัดดำเนินการจัดภาชนะรองรับไว้เฉพาะ ได้แก่ เศษอาหาร เศษผักและผลไม้ มอบหมายให้ผู้รับผิดชอบงานครัววัดนั้น ๆ ดำเนินการเก็บรวบรวมเพื่อนำไปสู่การจัดการต่อไป ปริมาณขยะเฉลี่ยสัปดาห์ละ 0.5 ตัน

5.4 โรงเรียนดำเนินการจัดภาชนะรองรับไว้เฉพาะ ได้แก่ เศษอาหาร เศษผักและผลไม้ มอบหมายให้ผู้รับผิดชอบประกอบอาหารกลางวันของโรงเรียนนั้น ๆ ดำเนินการเก็บรวบรวมเพื่อนำไปสู่การจัดการต่อไป ปริมาณขยะเฉลี่ยวันละ 0.15 ตัน

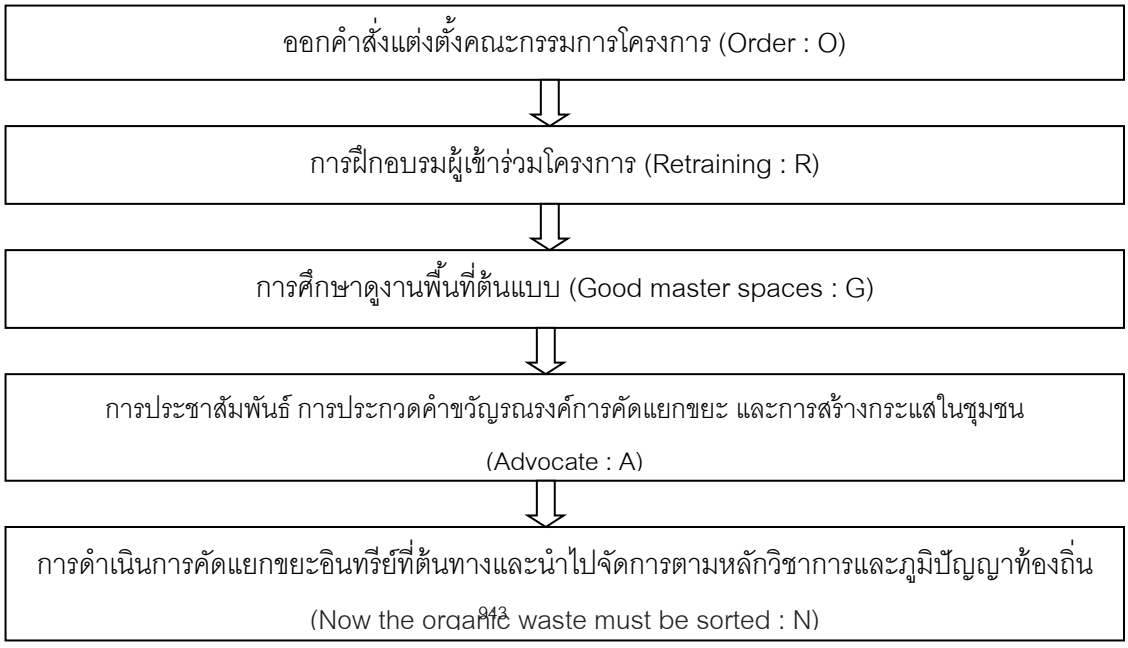
5.5 เทศบาลตำบลปัถวีดำเนินการจัดภาชนะรองรับไว้เฉพาะ ได้แก่ เศษอาหาร เศษผัก เศษผลไม้และเศษหญ้าจากการตกแต่งสนามฟุตบอลมอบหมายให้กองสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมดำเนินการเก็บรวบรวมเพื่อนำไปสู่การจัดการต่อไป

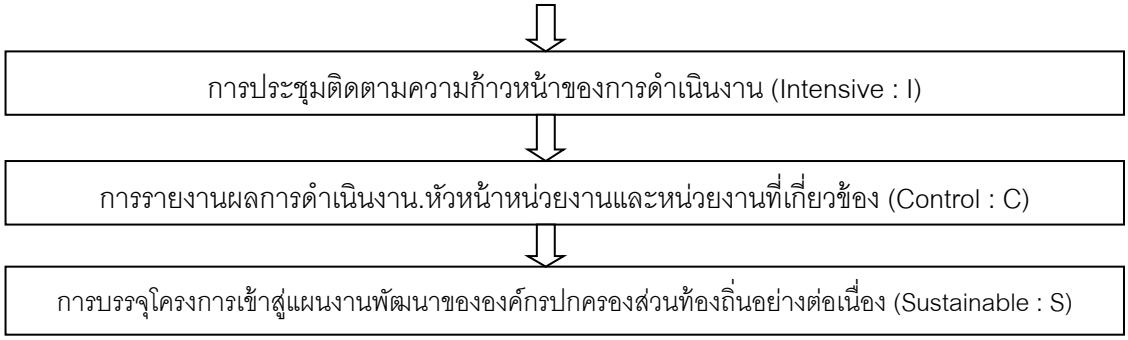
6) การประชุมติดตามความก้าวหน้า คณะกรรมการโครงการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการคัดแยกขยะที่ต้นทางจะจัดการประชุมทุก 3 เดือนหรือรายไตรมาส เพื่อติดตามความก้าวหน้าของการดำเนินงานและรับทราบรายงานการใช้งบประมาณตามโครงการ การพิจารณาแก้ไขปัญหาอุปสรรคที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน

7) การรายงานผลการดำเนินงาน เจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบโครงการจะต้องรายงานผลการดำเนินงานรายเดือน รายไตรมาส และเมื่อเสร็จสิ้นโครงการให้นายกเทศมนตรีตำบลปัถวีและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทราบ

8) การดำเนินงานอย่างต่อเนื่องและยั่งยืน เทศบาลตำบลปัถวีได้นำโครงการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการคัดแยกขยะที่ต้นทางบรรจุลงในแผนพัฒนา 4 ปี (พ.ศ. 2561 - 2564) เพื่อจะได้ดำเนินงานอย่างต่อเนื่องภายใต้งบประมาณตามเทศบัญญัติงบประมาณรายจ่ายประจำปีของปีถัดไป

ขั้นตอนการส่งเสริมให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมคัดแยกขยะอินทรีย์ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี ORGANICS - Wastes Pattawee Municipality Model





2. วิธีการจัดการขยะอินทรีย์ในพื้นที่ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี มีวิธีการดังนี้

1) ระดับครัวเรือนจัดการขยะอินทรีย์ ได้แก่ เศษผักผลไม้ เศษวัสดุจากการเกษตร โดยนำไปทำเป็นปุ๋ยหมักในตะกร้าเพื่อใช้ประโยชน์ในครัวเรือน ด้วยวิธีวิศวกรรมแม่โจ้ 1 ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งการทำปุ๋ยหมักแบบนี้เหมาะกับเศษวัสดุในบ้านที่มีปริมาณไม่มากไว้ในตะกร้าหรือเข่งพลาสติกที่มีรูระบายอากาศด้านข้างได้ วิธีการคือ นำเศษผักผลไม้ เศษวัสดุจากการเกษตร วางในเข่งพลาสติกหรือตะกร้าให้หนา 5 เซนติเมตร โรยมูลสัตว์ในอัตราส่วนเศษวัสดุ 3 ส่วน มูลสัตว์ 1 ส่วน แล้วรดน้ำและทำอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนเต็มด้านบนสุดโรยมูลสัตว์ การดูแลความชื้นโดยการรดน้ำวันละครั้งและทุก 10 วัน ใช้สายยางเปิดน้ำแล้วเสียบลงไปในเข่งลึก ๆ ระยะห่างของรูที่เสียบประมาณ 10 เซนติเมตร หมักไว้ 2 เดือนโดยไม่ต้องพลิกกลับใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 60 วัน สามารถนำไปใส่พืชผักสวนครัว ไม้ยืนต้น ส่วนเศษอาหารนำไปทำเป็นปุ๋ยน้ำโดยการหมักรวมกับกากน้ำตาล อัตราส่วนเศษอาหาร 3 กิโลกรัม กากน้ำตาล 1 กิโลกรัม และน้ำเปล่า 10 ลิตร หมักไว้ 3 เดือน จะได้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสามารถนำไปใช้พ่นทางใบให้แก่พืชในอัตราปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพ 1 ส่วนต่อน้ำเปล่า 500 ส่วน

2) ผู้ประกอบการแผงผลไม้จัดการขยะอินทรีย์ โดยนำเศษเปลือกผลไม้และผลไม้ที่จำหน่ายไม่หมดและเน่าเสีย มอบให้เทศบาลตำบลปัถวีเก็บขนและนำมากองรวมกันไว้บริเวณลานด้านหลังเทศบาลตำบลปัถวี เพื่อทำเป็นปุ๋ยหมักแบบไม่พลิกกลับกอง ด้วยวิธีวิศวกรรมแม่โจ้ 1 ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยนำเศษผลไม้ 3 ส่วนวางเป็นชั้นสูงไม่เกิน 10 เซนติเมตร ฐานกว้าง 2.5 เมตร โดยไม่ต้องขึ้นเหยียบ โปรยทับด้วยมูลสัตว์ 1 ส่วน แล้วรดน้ำ (ตัวอย่างเช่น เศษผลไม้ 9 เข่ง หนา 10 ซม. โรยทับด้วยมูลสัตว์ 3 เข่ง เป็นต้น) ทำเช่นนี้ 15 - 17 ชั้น รดน้ำแต่ละชั้นให้มีความชื้นขึ้นกองปุ๋ยเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีความสูง 1.50 เมตร กองปุ๋ยจะมีความยาวเท่าไหร่ก็ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณเศษผลไม้และมูลสัตว์ ความสำคัญของการที่ต้องทำเป็นชั้นบาง ๆ 15 - 17 ชั้น ก็เพื่อให้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในมูลสัตว์ได้ใช้ทั้งคาร์บอนที่มีอยู่ในเศษผลไม้และธาตุไนโตรเจนที่มีในมูลสัตว์ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ซึ่งจะทำให้การย่อยสลายวัตถุดิบเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว หากมีพื้นที่ทำกองปุ๋ยน้อยสามารถทำเป็นทรงกระบอกในแนวตั้งได้อีกด้วยโดยใช้วงตาข่ายเป็นที่ล้อมรอบกองปุ๋ย ระยะเวลาทั้งสิ้น 60 วัน หลังจากนั้นได้นำตัวอย่างปุ๋ยหมักที่ได้ส่งตรวจห้องปฏิบัติการปุ๋ย กลุ่มพัฒนาการตรวจสอบพืชและปัจจัยการผลิต สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 6 ปรากฏผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน (N) มีปริมาณร้อยละ 1.4 ฟอสฟอรัส (P) มีปริมาณร้อยละ 0.7 โพเทียสเซียม (K) มีปริมาณร้อยละ 0.1 และอื่น ๆ (Table 1)

Table 1 Analytical results of primary nutrient elements and others. Fertilizer derived from the management of organic waste from fruit and vegetable waste that is not sold or rotten.

No.	Test Item	Results	Test Method
1	pH - value	6.1	In-house method based on FAMIC, part 3.3
2	moisture (%)	39.0	In-house method based on AOAC19thed , part 955.04
3	Total Nitrogen (%)	1.4	In-house method based on AOAC19thed , part 955.04
4	Total Phosphorus (%)	0.7	In-house method based on AOAC19thed , part 958.01
5	Total Potassium (%)	0.1	In-house method based on OMAF, part 4.3.3
6	Electrical Conductivity (dS/m)	0.8	In-house method based on FAMIC, part 3.4
7	Organic Matter (%)	29.8	In-house method based on FAMIC, part 4.11
8	C/N Ratio (%)	12:1	In-house method based on FAMIC, part 4.11
9	Total Calcium (%)	1.2	In-house method based on FAMIC, part 4.5
10	Total Magnesium (%)	0.3	In-house method based on FAMIC, part 4.6

3) วัดดำเนินการนำเศษอาหาร เศษผักและผลไม้ ไปหมักทำเป็นปุ๋ยน้ำโดยการหมักรวมกับกากน้ำตาล อัตราส่วนเศษอาหาร 3 กิโลกรัม กากน้ำตาล 1 กิโลกรัม และน้ำเปล่า 10 ลิตร หมักไว้ 90 วัน จะได้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสามารถนำไปใช้พ่นทางใบให้แก่พืชในอัตราปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพ 1 ส่วนต่อน้ำเปล่า 500 ส่วน

4) โรงเรียนดำเนินการนำเศษอาหารไปเลี้ยงสัตว์ เศษผัก เศษผลไม้ เศษใบไม้แห้ง นำไปทำเป็นปุ๋ยหมักในตะกร้าและวงตาข่ายโดยไม่พลิกกลับกองเพื่อใช้ประโยชน์ในโรงเรียนด้วยวิธีวิศวกรรมแม่โจ้ 1 ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ระยะเวลาทั้งสิ้น 60 วัน มอบหมายให้นักเรียนรับผิดชอบกองปุ๋ยหมักเป็นรายกลุ่ม

5) เทศบาลตำบลปัถวีดำเนินการนำเศษอาหาร เศษผัก เศษผลไม้ และเศษหญ้าจากการตกแต่งสนามฟุตบอลไปทำเป็นปุ๋ยหมักในตะกร้า วงตาข่าย และกองบนดิน โดยไม่พลิกกลับกองเพื่อใช้ประโยชน์ในเทศบาลตำบลปัถวี ด้วยวิธีวิศวกรรมแม่โจ้ 1 ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ระยะเวลาทั้งสิ้น 60 วัน มีการนำเศษผักและผลไม้จากโรงครัวของศูนย์พัฒนาเด็กเล็กไปเลี้ยงไส้เดือนดิน และการนำเศษผักและผลไม้ไปทำน้ำหมักชีวภาพ เช่น มะนาว มะกรูด สับปะรด มะละกอ ฟักทอง บอระเพ็ด กล้วยสุกและหน่อกล้วย เป็นต้น หลังจากนั้นได้นำตัวอย่างปุ๋ยหมักที่ได้ส่งตรวจห้องปฏิบัติการปุ๋ย กลุ่มพัฒนาการตรวจสอบพืชและปัจจัยการผลิต สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 6 พบว่าปุ๋ยหมักที่ได้จากการหมักเศษหญ้ามีไนโตรเจน (N) ปริมาณร้อยละ 1.2 ฟอสฟอรัส (P) ปริมาณร้อยละ 0.4 โพเทียสเซียม (K) ปริมาณร้อยละ 0.1 ปุ๋ยหมักที่ได้จากการหมักเศษอาหารมีไนโตรเจน (N) ปริมาณร้อยละ 1.2 ฟอสฟอรัส (P) ปริมาณร้อยละ 1.5 โพเทียสเซียม (K) ปริมาณร้อยละ 0.4 ปุ๋ยหมักที่ได้จากไส้เดือนดินมีไนโตรเจน (N) ปริมาณร้อยละ 1.4 ฟอสฟอรัส (P) ปริมาณร้อยละ 1.2 โพเทียสเซียม (K) ปริมาณร้อยละ 0.6 (Table 1 2 3 and 4)

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารหลักที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ ได้แก่ เศษผักและผลไม้ เศษหญ้า เศษอาหาร และการเพาะเลี้ยงไส้เดือนดิน เทียบกับเกณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (กรมวิชาการเกษตร, 2557) พบว่า ปุ๋ยหมักจากการเพาะเลี้ยงไส้เดือนดินมีปริมาณธาตุอาหารหลักผ่านเกณฑ์ทั้งหมด (Table 5)

Table 2 Analytical results of primary nutrient elements and others. Fertilizer derived from the management of organic waste from grass wastes.

No.	Test Item	Results	Test Method
1	pH - value	6.7	In-house method based on FAMIC, part 3.3
2	moisture (%)	56.3	In-house method based on AOAC19thed , part 955.04
3	Total Nitrogen (%)	1.2	In-house method based on AOAC19thed , part 955.04
4	Total Phosphorus (%)	0.4	In-house method based on AOAC19thed , part 958.01
5	Total Potassium (%)	0.1	In-house method based on OMAF, part 4.3.3
6	Electrical Conductivity (dS/m)	0.3	In-house method based on FAMIC, part 3.4
7	Organic Matter (%)	26.5	In-house method based on FAMIC, part 4.11
8	C/N Ratio (%)	13:1	In-house method based on FAMIC, part 4.11
9	Total Calcium (%)	0.8	In-house method based on FAMIC, part 4.5
10	Total Magnesium (%)	0.2	In-house method based on FAMIC, part 4.6

Table 3 Analytical results of primary nutrient elements and others. Fertilizer derived from the management of organic waste from food wastes.

No.	Test Item	Results	Test Method
1	pH - value	7.2	In-house method based on FAMIC, part 3.3
2	moisture (%)	54.6	In-house method based on AOAC19thed , part 955.04
3	Total Nitrogen (%)	1.2	In-house method based on AOAC19thed , part 955.04
4	Total Phosphorus (%)	1.5	In-house method based on AOAC19thed , part 958.01
5	Total Potassium (%)	0.4	In-house method based on OMAF, part 4.3.3
6	Electrical Conductivity (dS/m)	2.4	In-house method based on FAMIC, part 3.4
7	Organic Matter (%)	20.6	In-house method based on FAMIC, part 4.11
8	C/N Ratio (%)	10:1	In-house method based on FAMIC, part 4.11
9	Total Calcium (%)	1.3	In-house method based on FAMIC, part 4.5
10	Total Magnesium (%)	0.5	In-house method based on FAMIC, part 4.6

6) การแปรรูปขยะอินทรีย์เป็นผลิตภัณฑ์ใช้ในชีวิตประจำวันและลดภาระค่าใช้จ่ายในครัวเรือน โดยการนำน้ำหมักผลไม้รสเปรี้ยว เช่น มะกรูด มะนาว ส้มจี๊ด (มะปริ๊ด) สับปะรด มาแปรรูปเป็นน้ำยาเอนกประสงค์ (ล้างจาน) สบู่เหลว สบู่ก้อน แชมพู ทั้งนี้มีประชาชนที่เป็นสมาชิกกลุ่มสตรีอาสาพัฒนาได้รวมกลุ่มประมาณ 5 -10 คน หมักผลไม้รสเปรี้ยวจนครบกำหนดที่จะใช้งานได้ เทศบาลตำบลปัถวีจึงสนับสนุนสารตั้งต้นเพื่อทำผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันดังกล่าวข้างต้น ด้วยการร่วมมือกันระหว่างกลุ่มสตรีอาสาพัฒนาและพนักงานเทศบาลดำเนินการช่วงวันหยุดราชการ สามารถลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนได้อีกทางหนึ่ง

Table 4 Analytical results of primary nutrient elements and others. Fertilizer derived from the management of organic waste from vermicompost.

No.	Test Item	Results	Test Method
1	pH - value	6.9	In-house method based on FAMIC, part 3.3
2	moisture (%)	48.8	In-house method based on AOAC19thed , part 955.04
3	Total Nitrogen (%)	1.4	In-house method based on AOAC19thed , part 955.04
4	Total Phosphorus (%)	1.2	In-house method based on AOAC19thed , part 958.01
5	Total Potassium (%)	0.6	In-house method based on OMAF, part 4.3.3
6	Electrical Conductivity (dS/m)	2.1	In-house method based on FAMIC, part 3.4
7	Organic Matter (%)	30.8	In-house method based on FAMIC, part 4.11
8	C/N Ratio (%)	13:1	In-house method based on FAMIC, part 4.11
9	Total Calcium (%)	1.2	In-house method based on FAMIC, part 4.5
10	Total Magnesium (%)	0.4	In-house method based on FAMIC, part 4.6

Table 5 Comparative of primary nutrient elements between fertilizer derived from the management of organic waste and standard organic fertilizer of department of agriculture.

Primary nutrient elements	Department of agriculture	fruit and vegetable waste	grass wastes	food wastes	vermicompost
Nitrogen (%)	1.0	1.4*	1.2*	1.2*	1.4*
Phosphorus (%)	0.5	0.7*	0.4	1.5*	1.2*
Potassium (%)	0.5	0.1	0.1	0.4	0.6*

* Means pass organic fertilizer standard of department of agriculture.

3. ผลการจัดการขยะอินทรีย์ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี มีดังนี้

1) ขั้นตอนและวิธีการส่งเสริมให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมคัดแยกที่ต้นทางและจัดการขยะอินทรีย์มีการดำเนินงานอย่าเป็นระบบโดยเริ่มจากการแต่งตั้งคณะกรรมการที่เชิญบุคคลจากภาคส่วนต่าง ๆ ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องหรือผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเข้ามาเป็นกรรมการทำให้สามารถระบุปัญหา กำหนดแนวทางการดำเนินงาน การลงมือปฏิบัติ การประเมินผล ผลการดำเนินงานที่ประสบผลสำเร็จเชิงประจักษ์จากการได้รับรางวัลต้นแบบการจัดการขยะจากกรมควบคุมมลพิษระดับประเทศ ประจำปี พ.ศ. 2559 และ 2560 รางวัลความเป็นเลิศโครงการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการคัดแยกขยะที่ต้นทางของกองทุนสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ประจำปี พ.ศ. 2560

2) วิธีการจัดการขยะอินทรีย์ด้วยการนำไปทำปุ๋ยหมักซึ่งมาจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ เศษผักและผลไม้ เศษหญ้า เศษอาหาร และการเพาะเลี้ยงไส้เดือนดิน ทำให้ได้ปุ๋ยอินทรีย์ไว้ใช้ประโยชน์สำหรับการเพาะปลูกพืชในระดับครัวเรือน และระดับชุมชน ส่งผลให้ปริมาณขยะอินทรีย์ลดลงอย่างต่อเนื่องเปรียบเทียบแต่เมื่อเริ่มโครงการมีปริมาณขยะอินทรีย์ 2.33 ตันต่อวัน และเมื่อสิ้นสุดโครงการมีปริมาณขยะอินทรีย์ลดลงเหลือ 0.85 ตันต่อวัน (Figure 1)

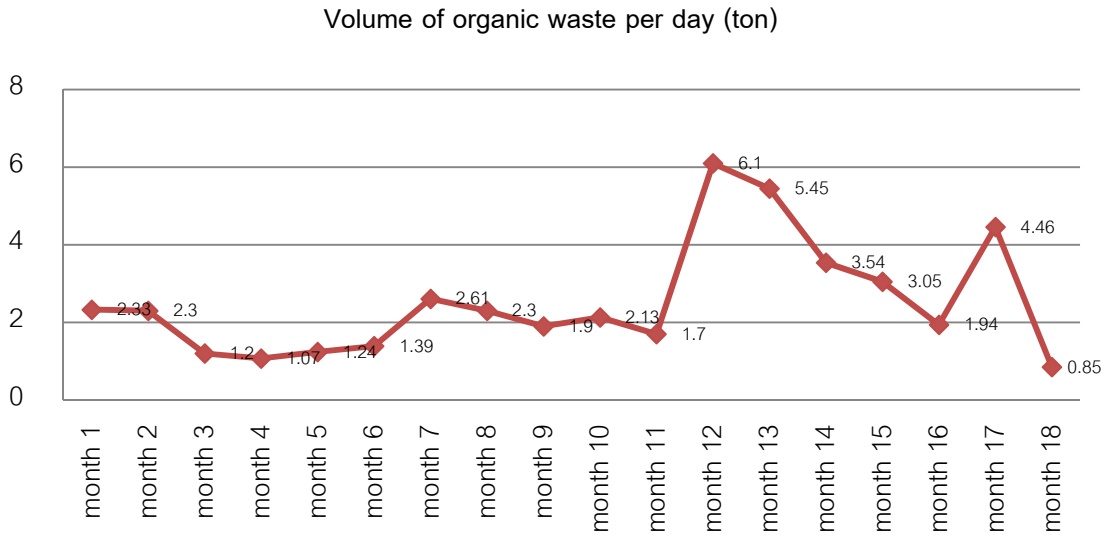


Figure 1 Volume of organic waste per day are project start point 2.33 tons per day and when end of project point 0.85 tons per day.

อภิปรายผล

การศึกษาการจัดการขยะอินทรีย์ของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี มีประเด็นที่จะนำมาอภิปราย ดังนี้

1. ขั้นตอนและวิธีการการส่งเสริมให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมคัดแยกขยะอินทรีย์ที่ต้นทางของเทศบาลตำบลปัถวี อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี มีขั้นตอนการดำเนินงานตั้งแต่การออกคำสั่งแต่งตั้งคณะกรรมการ การจัดประชุม การรับสมัครผู้เข้าร่วมโครงการ การฝึกอบรมและศึกษาดูงานพื้นที่ต้นแบบ การรณรงค์ประชาสัมพันธ์ให้ชุมชนได้ รับทราบข้อมูลข่าวสาร การลงมือคัดแยกขยะที่ต้นทางและจัดการตามหลักวิชาการหรือภูมิปัญญาท้องถิ่น มีการติดตามความก้าวหน้า การรายงานผลการดำเนินงานให้คณะกรรมการทราบรายไตรมาส และเมื่อสิ้นสุดการดำเนินงานแล้วได้นำโครงการบรรจุเข้าแผนพัฒนาขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับการศึกษาเรื่องการจัดการขยะขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น : กรณีศึกษาเทศบาลตำบลเมืองแกลง จังหวัดระยอง ของพีรยา (2556) พบว่า กระบวนการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลเมืองแกลงเริ่มต้นจากการรณรงค์ประชาสัมพันธ์ให้ประชาชนได้รับความรู้เรื่องการคัดแยกขยะจากบ้านเรือน เทศบาลมีการคัดแยกขยะมีการส่งเสริมให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องในองค์กรพัฒนาศักยภาพตนเองด้านการจัดการขยะ มีการวางเป้าหมายในด้านการจัดการขยะมูลฝอย ผู้นำชุมชนและเจ้าหน้าที่เป็นตัวกลางการทำงานระหว่างเทศบาลกับประชาชน และสอดคล้องกับการศึกษาเรื่องแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยแบบครบวงจรและการมีส่วนร่วมของชุมชนในเขตพื้นที่เทศบาลเมืองท่าข้าม จังหวัดสุราษฎ์ธานี ของ วัสสา และคณะ (2554) พบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองท่าข้ามจำเป็นต้องดำเนินการส่งเสริมการคัดแยกที่แหล่งกำเนิดโดยเฉพาะ โดยใช้หลักการให้ชุมชนมีส่วนร่วมในการค้นหาแนวทางในการแก้ไขปัญหา ตัดสินใจเลือกวิธีดำเนินการจัดการมูลฝอยในชุมชน และทำแผนปฏิบัติการที่ดำเนินการร่วมกันระหว่างเทศบาลและชุมชน

2. การจัดการขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการนำเศษผักและผลไม้ไปเลี้ยงไส้เดือนดินเมื่อวิเคราะห์ปุ๋ยที่ได้จากการเพาะเลี้ยงไส้เดือนดินมีธาตุอาหารหลักสูงกว่ากำหนดเกณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2557 กรมวิชาการเกษตร (N)

ไนโตรเจนทั้งหมด 1.4% (P) ฟอสฟอรัสทั้งหมด 1.2 % และ (K) โพแทสเซียมทั้งหมด 0.6 % ค่าอินทรียวัตถุเฉลี่ยเท่ากับ 30.8% สอดคล้องกับการศึกษาเรื่องศักยภาพการผลิตปุ๋ยมูลไส้เดือนดินจากผักตบชวาบริเวณคลองส่งน้ำในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาของ สกุลเทพ และคณะ (2559) พบว่า ค่าเฉลี่ยวัตถุอินทรีย์เฉลี่ยเท่ากับ 25% ค่าธาตุอาหารหลักของพืช Total N, available P_2O_5 และ K_2O เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.44% 1.05% และ 2.08% ตามลำดับ

สรุป

ขั้นตอนและวิธีการการส่งเสริมให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมคัดแยกขยะอินทรีย์ที่ต้นทางของเทศบาลตำบลปัถวี เริ่มจาก 1) การออกคำสั่งแต่งตั้งคณะกรรมการ 2) การฝึกอบรมให้แก่ผู้เข้าร่วมโครงการและศึกษาดูงานพื้นที่ต้นแบบ 3) การประชาสัมพันธ์ 4) การคัดแยกขยะอินทรีย์ระดับครัวเรือน ชุมชน วัด และสถานที่ราชการ 5) การติดตามความก้าวหน้า 6) การรายงานผลการดำเนินงาน และ 7) การบรรจุโครงการในแผนพัฒนา 4 ปี ส่วนวิธีการจัดการขยะอินทรีย์ในพื้นที่ของเทศบาลตำบลปัถวี ได้แก่ การนำไปเลี้ยงสัตว์ การนำไปทำปุ๋ยหมัก โดยเฉพาะปุ๋ยหมักจากการเพาะเลี้ยงไส้เดือนดินมีปริมาณธาตุอาหารหลักสำหรับพืช (N P K) ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตรสูงที่สุด และปริมาณขยะอินทรีย์ลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มโครงการ 2.33 ตันต่อวัน เมื่อสิ้นสุดโครงการลดลงเหลือ 0.85 ตันต่อวัน

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2558. **Road Map การจัดการขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย**. แหล่งที่มา : http://infofile.pcd.go.th/waste/Roadmapbook.pdf?CFID=19440059&CFTOKEN=14202960, 20 พฤศจิกายน 2558.

กรมวิชาการเกษตร. 2557. **ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง กำหนดเกณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2557**. แหล่งที่มา : http://www.doa.go.th/ard/FileUpload/Fertilizer/fertilizer_law/fertact20.pdf, 15 มกราคม 2560.

กองสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อม. 2558. **แผนพัฒนา 4 ปี**. เทศบาลตำบลปัถวี, จันทบุรี. (อัดสำเนา)

สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2558. **มติการประชุมคณะกรรมการกองทุนสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 7/2558 เมื่อวันที่ 9 ตุลาคม 2558**. แหล่งที่มา : http://envfund.onep.go.th/wp-content/uploads/2017/02/7-2558.pdf, 20 พฤศจิกายน 2558.

พีรยา วัชโรทัย. 2556. **การจัดการขยะขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น : กรณีศึกษาเทศบาลตำบลเมืองแกลง จังหวัดระยอง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

วัสสา คงนคร, จริวัฒน์ สกุลรัตน์, อภิวัฒน์ อายุสุข และ มุกดา ศรีสวัสดิ์. 2554. แนวทางการจัดการขยะมูลฝอยแบบครบวงจรและการมีส่วนร่วมของชุมชนในเขตพื้นที่เทศบาลเมืองท่าข้าม จังหวัดสุราษฎ์ธานี. หน้า 1-15. *ใน* **รายงานการวิจัยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช)**. กรุงเทพมหานคร.

สกุลเทพ ชูพงษ์, กิตติ บุญเลิศนิรันทร์ และ พิชญ์ ตั้งสมบัติวิจิตร. 2559. การศึกษาศักยภาพการผลิตปุ๋ยมูลไส้เดือนดินจากผักตบชวาบริเวณคลองส่งน้ำในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา. หน้า 519-524. *ใน* **การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 1 (The 1st RUSNC)**. พระนครศรีอยุธยา.

การคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ลิกนิโนไลติกจากตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษ

Isolation of Ligninolytic Enzyme Producing Bacteria from Sludge and Paper Mill Wastewater

พรรณี มณีชัย[1] และ สุชัญญา ทองเครือ[1*]

Phannee Maneechai[1] and Suchanya Thongkrua[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์ลิกนิโนไลติกจากตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษ ทำการคัดแยกแบคทีเรียที่สามารถเจริญบนอาหารมินิมอลซอลมีเดียมที่มีส่วนผสมของแอลคาไลน์ลิกนินร้อยละ 0.1 พบว่าแบคทีเรียที่คัดแยกได้มีทั้งหมด 38 ไอโซเลท ซึ่งได้จากตะกอนจุลินทรีย์ 12 ไอโซเลท ได้แก่ LS1- LS12 และได้จากน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษ 26 ไอโซเลท ได้แก่ LW1- LW26 เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการผลิตเอนไซม์ดังกล่าวบนอาหารแข็งโดยวิธีเพลทเอสเส มีแบคทีเรียทั้งหมด 9 ไอโซเลท ที่สามารถออกซิเดชันสีของอินดิเคเตอร์และให้ผลบวกทั้ง 3 เอนไซม์ ซึ่งได้จากตะกอนจุลินทรีย์ 2 ไอโซเลท และน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษ 7 ไอโซเลท เมื่อนำไปวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์พบว่าไอโซเลท LW4 มีค่ากิจกรรมเอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส สูงที่สุดเท่ากับ 90.47± 17.96 ยูนิตต่อลิตร ไอโซเลท LS1 มีค่ากิจกรรมเอนไซม์แมงกานีสเปอร์ออกซิเดสสูงที่สุดเท่ากับ 61.23± 4.25 ยูนิตต่อลิตร และไอโซเลท LW26 มีค่ากิจกรรมเอนไซม์แลคเคสสูงที่สุดเท่ากับ 1.80± 1.45 ยูนิตต่อลิตร

ABSTRACT

The purpose of this research was to isolate ligninolytic enzyme producing bacteria from sludge and paper mill wastewater. Bacteria were isolated on minimal salt medium (MSM) mixing 0.1%of alkaline lignin. The results show that total isolated bacteria were 38 isolates. 12 isolates were obtained from sludge as LS1-LS12 and 26 isolates were obtained from paper mill wastewater as LW1- LW26. Then, isolated bacteria were tested capacity of enzyme production by plate assay method. Total 9 isolated bacteria can oxidation of indicator dye and positive of 3 enzymes, which including from sludge for 2 isolates and from paper mill wastewater for 7 isolates. The isolated LW4 had the highest lignin peroxidase activity at 90.47± 17.96 Units/litter. The isolated LS1 had the highest manganese peroxidase activity at 61.23± 4.25 Units/litter. The isolated LW26 had the highest laccase activity at 1.80± 1.45 Units/litter.

Key Words: lignin degrading bacteria, lignin peroxidase, manganese peroxidase, laccase, sludge and pulp and paper mill wastewater

*Corresponding author, e-mail address: **suchanya_9@yahoo.com**

[1]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

[1]Major of Environmental Science, School of Energy and Environment, University of Phayao, Phayao, 56000

คำนำ

การผลิตเยื่อและกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มการผลิตที่สูงขึ้นทุกปี ซึ่งภาพรวมการผลิตกระดาษและผลิตภัณฑ์กระดาษปี 2559 มีปริมาณการผลิตรวมถึง 4.36 ล้านตัน (พิชญ์สินี, 2560) กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษใช้น้ำเป็นจำนวนมากถึง 31-54 ลูกบาศก์เมตรต่อตันเยื่อ มีน้ำเสียเกิดขึ้นถึง 29-40 ลูกบาศก์เมตรต่อตันเยื่อ (ปฏิมา, 2551) โดยเฉพาะน้ำเสียที่เกิดจากการต้มเยื่อ การล้างเยื่อ และการฟอกเยื่อกระดาษมีการปนเปื้อนลิกนินค่อนข้างสูง ซึ่งปริมาณลิกนินที่พบปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษในประเทศไทย 218- 290 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าสี 736- 957 Pt-Co Unit (Thongkrua, 2010) โดยลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็น Phenylpropane 3 ชนิด คือ Sinapyl, guauacyl และ p-hydroxyphenyl เชื่อมต่อด้วยพันธะหลายชนิดที่แตกต่างกัน ทำให้ย่อยสลายทางชีวภาพได้ค่อนข้างยาก หากอุตสาหกรรมกระดาษมีการปล่อยน้ำเสียที่ไม่ได้รับการบำบัดอาจทำให้เกิดผลกระทบคือ แหล่งน้ำที่รองรับน้ำเสียเกิดสีน้ำตาลเข้ม และอาจส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำในแหล่งน้ำ จึงทำให้เกิดการคิดค้นวิธีการในการบำบัดลิกนินและสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษโดยวิธีการทางชีวภาพ ได้แก่ การใช้เชื้อแบคทีเรียและเชื้อราในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งนิยมศึกษาเชื้อแบคทีเรียมากกว่าเชื้อรา เนื่องจากแบคทีเรียสามารถย่อยสลายลิกนินได้โดยการผลิตเอนไซม์ในกลุ่ม ligninolytic enzyme ได้แก่ เอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส (LiP) แมงกานีสเปอร์ออกซิเดส (MnP) และแลคเคส (Lac) ซึ่งเป็น extracellular enzyme สามารถย่อยสลายลิกนินโดยการออกซิไดซ์สารประกอบ phenolic aromatic และ nonphenolic aromatic โดยเข้าไปทำลายวงแหวนโพลิเมอร์ที่ซับซ้อนของลิกนินได้ รวมถึงสามารถลดสีในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Shi *et al*., 2013) นอกจากนี้แบคทีเรียยังสามารถพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งสามารถปรับตัวและเจริญได้ดีในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลายกว่าเชื้อรา (Renugadevi *et al*, 2011) และยังพบว่าเชื้อรามีการผลิตเอนไซม์ในกลุ่ม ligninolytic enzyme ค่อนข้างต่ำในการย่อยสลายลิกนินในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรด - ด่างสูง หรือในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด รวมถึงความเข้มข้นของลิกนินในปริมาณสูง (Jing *et al*., 2009) จากการศึกษาของ Yadave and Chandra (2015) ใช้ *Bacillus subtilis* และ *Klebsiella pneumonia* ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษร่วมกัน พบว่ามีกิจกรรมเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac เท่ากับ 3.4, 2.3 และ 4.5 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ สามารถลดลิกนินได้ร้อยละ 58 และลดสีได้ร้อยละ 79 หลังจากเวลา 148 ชั่วโมง ซึ่งการนำวิธีการทางชีวภาพมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้แทนการบำบัดด้วยวิธีการทางกายภาพและทางเคมีที่มีค่าใช้จ่ายสูง และสารเคมีอาจมีผลตกค้างในสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์ในกลุ่ม ligninolytic enzyme ได้แก่ เอนไซม์ LiP, MnP และLac จากตะกอนจุลินทรีย์ (sludge) และตัวอย่างจากบ่อเติมอากาศของระบบแอคทิเวเต็ดสลัดจ์ (activated sludge) จากอุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำแบคทีเรียที่คัดแยกได้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ (sludge) และน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษ

เก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ขั้นที่ 1 (first waste sludge) ซึ่งเป็นตอนกอนจุลินทรีย์ที่มีน้ำเสียเป็นส่วนประกอบร้อยละ 70 จากบ่อพักตะกอน และตัวอย่างจากบ่อเติมอากาศของระบบแอคทิเวเต็ดสลัดจ์

(activated sludge) ปริมาตรอย่างละ 100 มิลลิลิตร ในขวดสีชาที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว โดยแยกขวดแต่ละตัวอย่างและเก็บรักษาสภาพไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำส่งห้องปฏิบัติการภายใน 24 ชั่วโมง เพื่อทำการคัดแยกเชื้อแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac และใช้ในการทดลองต่อไป (Sasikumar *et al*., 2014)

การคัดแยกแบคทีเรียและการทำให้บริสุทธิ์

คัดแยกแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac โดยนำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ และตัวอย่างจากบ่อเติมอากาศของระบบแอคทิเวเต็ดสลัดจ์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพูที่มีอาหาร minimal salt medium broth (MSM- KL) ประกอบด้วย K_2HPO_4 4.55 g/L, K_2HPO_4 0.53 g/L, $MgSO_4$ 0.5 g/L, NH_4NO_3 5 g/L, alkaline lignin 1 g/L ปริมาตร 95 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปบ่มและเขย่าด้วยเครื่อง Shaker incubator ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นทำการเจือจางแบบลำดับส่วน 10 เท่า (Serial dilution 10 fold) ในหลอดทดลองที่มีร้อยละ 0.9 ของ Normal saline ปริมาตร 9 มิลลิลิตร โดยทำการ เจือจางที่ความเข้มข้น 10^{-2} ถึง 10^{-5} จากนั้นปิเปตตัวอย่างที่ความเจือจาง 10^{-3} ถึง 10^{-5}ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ทำการ splate plate บนอาหารแข็ง MSM- KL agar จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ทำการคัดเลือกโคโลนีแบคทีเรียและทำให้บริสุทธิ์ และนำไปทดสอบความสามารถของแบคทีเรียในการผลิตเอนไซม์ดังกล่าวข้างต้นต่อไป

การคัดแยกแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac

นำแบคทีเรียที่คัดแยกได้มาทดสอบความสามารถในการผลิตเอนไซม์โดยวิธี plate assay การผลิตเอนไซม์ LiP โดยการนำเชื้อแบคทีเรียมา streak บนอาหารแข็ง Luria Bertani (LB) ประกอบด้วย tryptone 10 g/L, Yeast extract 5 g/L, sodium chloride 5 g/L, agar 15 g/L ที่มีส่วนผสมของ methylene blue ปริมาณ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นอินดิเคเตอร์และปรับค่าความเป็นกรด– ด่าง (pH) ของอาหารให้เท่ากับ 7.0 และใช้เชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* เป็น negative control (Picart *et al*., 2016) ส่วนการผลิตเอนไซม์ MnP และ Lac จะ streak แบคทีเรียที่คัดแยกได้บนอาหาร B&K agar medium ประกอบด้วย dextrose 10 g/L, peptone 5 g/L, NaCl 5 g/L, beef extract 3 g/L, $CuSO_4$ 1 mM, agar 15 g/L โดยมีส่วนผสมของอินดิเคเตอร์ที่ต่างกันคือ phenol red ร้อยละ 0.1 และ guaiacol ($C_7H_8O_2$) 0.5 มิลลิโมล และปรับpH ของอาหารให้เท่ากับ 7.0 จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 72 ชั่วโมง ถ้าหากเชื้อแบคทีเรียผลิตเอนไซม์ LiP ได้ จะเกิดการออกซิเดชันอินดิเคเตอร์และเกิดโซนใสรอบโคโลนี ส่วนการผลิตเอนไซม์ MnP อาหารจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้มถึงสีเหลือง ส่วนการผลิตเอนไซม์ Lac อาหารจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลบริเวณรอบ ๆโคโลนีของแบคทีเรีย (Verma and Ekka, 2016) และทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของเชื้อแบคทีเรียที่ให้ผลบวกทั้ง 3 เอนไซม์ และนำไปทดสอบหาค่ากิจกรรมเอนไซม์ดังกล่าวข้างต้นต่อไป

การวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ LiP, MnP และ Lacc

การเตรียม Crude enzyme

นำแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac โดยวิธี plate assay มาวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ โดยเขี่ยเชื้อแบคทีเรียจำนวน 2 ลูป (loop) จากอาหาร MSM- KL agar ใส่ลงในอาหารเหลว MSM- KL ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปบ่มและเขย่าด้วยเครื่อง Shaker incubator ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำไปปรับความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV- Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ให้มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.08 ถึง 0.1 ซึ่งจะมีเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 1.5×10^{8} CFU/ml แล้วนำตัวอย่างไปปั่นตกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แยกเก็บส่วนใส (supernatant) และเรียกส่วนนี้ว่า crude enzyme (Patil, 2014) จากนั้นนำไปวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac ต่อไป

วิธีวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac

นำ crude enzyme ที่ได้มาวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์โดยมีสับสเตรทต่างกัน โดยเอนไซม์ LiP ใช้สับสเตรทคือ veratryl alcohol และวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV- Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 310 นาโนเมตร ส่วนเอนไซม์ MnP และLac ใช้สับสเตรทคือ $C_7H_8O_2$ และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 465 และ 450 นาโนเมตร ตามลำดับ วิเคราะห์โดยใช้วิธีของ Rahman *et al*. (2013) ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และคำนวณหาค่ากิจกรรมเอนไซม์ดังกล่าว ดังสมการที่ 1 (Silva *et al*., 2010)

$$\text{กิจกรรมเอนไซม์ (ยูนิตต่อลิตร)} = \frac{\Delta\text{Abs} \times 10^{6}}{\varepsilon \times R \times T} \quad (1)$$

โดย ΔAbs คือ ค่าแตกต่างของการดูดกลืนแสงระหว่างสุดท้ายและเริ่มต้น

ε คือ ค่า molar extinction coefficient ของแต่ละเอนไซม์ (โมลต่อลิตรต่อเซนติเมตร)
เอนไซม์ LiP = 9,300, MnP = 12,100, Lac = 12,100

R คือ ปริมาตรของส่วนใส (Supernatant) หรือ Crude enzyme (มิลลิลิตร)

T คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (นาที)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

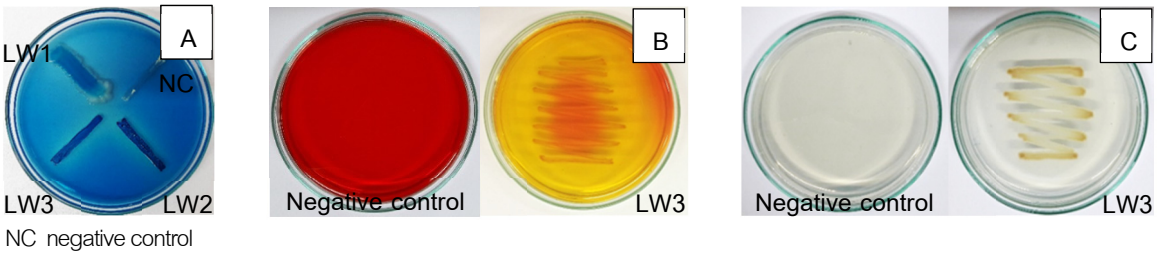
แบคทีเรียที่คัดแยกได้จากตะกอนจุลินทรีย์ (sludge) และน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษ

จากการทดลองสามารถคัดแยกแบคทีเรียที่สามารถเจริญบนอาหารแข็ง MSM-KL agar ได้ทั้งหมด 38 ไอโซเลท โดยคัดแยกแบคทีเรียจากตะกอนจุลินทรีย์ได้ 12 ไอโซเลท ได้แก่ LS1- LS12 ส่วนแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากตัวอย่างบ่อเติมอากาศของระบบแอคทิเวเต็ดสลัดจ์ คัดแยกได้ 26 ไอโซเลท ได้แก่ LW1- LW26

แบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ LiP, MnP และ Lacc

นำแบคทีเรียที่คัดแยกได้ทั้งหมด 38 ไอโซเลท มาทดสอบความสามารถในการผลิตเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac โดยวิธี plate assay พบเชื้อแบคทีเรียที่ให้ผลบวกทั้ง 3 เอนไซม์ ได้แก่ ไอโซเลท LW3, LW4, LW9, LW12, LW20, LW25, LW26, LS1 และ LS7 (Figure 1) และนำมาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่าไอโซเลท LW3, LW4, LW9, LW12, LW25, LW26, LS1 และLS7 ติดสีแกรมลบ รูปร่างท่อนสั้น (rod shape)

มีการจัดเรียงตัวแบบกลุ่มและกระจาย และไอโซเลท LW20 ติดสีแกรมบวก รูปร่างท่อนสั้น (rod shape) มีการจัดเรียงตัวแบบกลุ่มและกระจาย (Figure 2)



NC negative control

Figure 1 Example of positive result of potential bacterial isolated for LiP (A), MnP (B) and lac (C) by plate assay method

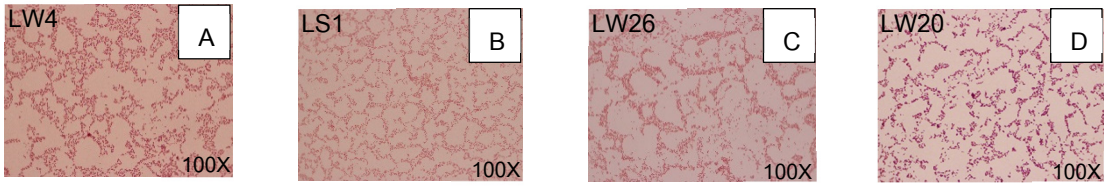


Figure 2 Example of morphology bacterial isolated negative gram strain (A-C) and positive gram strain (D)

กิจกรรมเอนไซม์ LiP, MnP และ Lacc

นำแบคทีเรียที่ให้ผลบวกในการผลิตเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac ทั้ง 3 ชนิด โดยวิธี plate assay มาวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ พบว่าไอโซเลท LW4 มีค่ากิจกรรมเอนไซม์ LiP สูงที่สุดเท่ากับ 90.47± 17.96 ยูนิตต่อลิตร ไอโซเลท LS1 มีค่ากิจกรรมเอนไซม์ MnP สูงที่สุดเท่ากับ 61.23± 4.25 ยูนิตต่อลิตร และไอโซเลท LW26 มีค่ากิจกรรมเอนไซม์ Lac สูงที่สุดเท่ากับ 1.80± 1.45 ยูนิตต่อลิตร (Table 1) เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าการใช้ *Serratia mercescens*, *Serratia liquefaciens* และ *Bacillus cereus* อัตราส่วน 4:1:1 ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษร่วมกัน พบว่ามีกิจกรรมเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac เท่ากับ 0.178, 0.247 และ 0.241 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ สามารถลดลิกนินได้ร้อยละ 95 และลดสีของน้ำเสียได้ร้อยละ 65.06 หลังจากเวลา 7 วัน (Chandra *et al*., 2011) ขณะที่การใช้ *Pseudochrobactrum glaciale*, *Providencia rettgeri* และ *Pantoea* sp.ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษร่วมกัน พบว่ามีกิจกรรมเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac เท่ากับ 5.56, 3.58 และ 3.70 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ สามารถลดสีน้ำเสียได้ร้อยละ 96.02 หลังจากเวลา 216 ชั่วโมง (Chandra and Singh, 2012) นอกจากนี้การใช้ *Bacillus subtilis* และ *Klebsiella pneumonia* ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษร่วมกัน พบว่ามีกิจกรรมเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac เท่ากับ 3.4, 2.3 และ 4.5 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ สามารถลดลิกนินได้ร้อยละ 58 และลดสีน้ำเสียได้ร้อยละ 79 หลังจากเวลา 148 ชั่วโมง (Yadave and Chandra , 2015) ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าแบคทีเรียที่สามารถผลิต ligninolytic enzyme ได้ จะมีความสามารถในการย่อยสลายโครงสร้างของลิกนิน และส่งผลให้ความเข้มของสีลดลงได้ (Chandra *et al*., 2007) และจากการวัดกิจกรรม ligninolytic enzyme ในชุดควบคุม (control) ของการศึกษานี้ไม่พบกิจกรรมเอนไซม์

ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายโพลิเมอร์ของลิกนินเกิดจากเชื้อแบคทีเรียมีการผลิตเอนไซม์ ligninolytic enzyme ที่ประกอบด้วยเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac โดยการผลิตเอนไซม์ LiP และ MnP จำเป็นต้องอาศัย hydrogen peroxide (H_2O_2) ซึ่งจะถูกผลิตในกระบวนการ glucose oxidation และขณะเดียวกัน H_2O_2 จะผลิตออกมาเป็นจำนวนมากในช่วงระยะเริ่มต้นของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Ko *et al*., 2009) หลังจากนั้นแบคทีเรียจะผลิตเอนไซม์ Lac ในระยะต่อมาของการเจริญเติบโตเพื่อใช้ในกระบวนการย่อยสลายลิกนิน นอกจากนี้เอนไซม์ LiP, MnP และ Lac มีการรายงานว่าสามารถย่อยสลายสารประกอบ phenolic และ nonphenolic ได้ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ยังเป็นส่วนประกอบหลักของโครงสร้างลิกนินที่สำคัญโดยทำให้ลิกนินทนต่อการย่อยสลายในสิ่งแวดล้อม และเป็นสารประกอบโพลิเมอร์ที่พบในน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษ อย่างไรก็ตามการผลิต ligninolytic enzyme ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ สารตั้งต้น (substrate) และศักยภาพของจุลินทรีย์ในการหลั่งเอนไซม์แต่ละชนิด เมื่อเทียบกับการศึกษาของ Arora *et al*. (2002) ที่ศึกษาการผลิต ligninolytic enzyme ของเชื้อรา *Phlebia* spp. พบว่าสามารถหลั่งเอนไซม์ในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งตรงกันข้ามกับแบคทีเรียที่สามารถหลั่ง ligninolytic enzyme ได้ในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่หลากหลาย และยังคงสามารถเจริญเติบโตและผลิตเอนไซม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Chandra *et al*., 2011)

Table 1 Ligninolytic enzyme activity in potential bacterial isolates

Bacterial isolates	Enzyme activity (U/L)		
	LiP	MnP	Lacc
LW3	82.15± 3.25	58.20± 0.98	0.96± 0.01
LW4	90.47± 17.96	58.20± 0.43	0.98± 0.02
LW9	80.72± 6.44	58.20± 1.60	0.97± 0.01
LW12	73.26± 2.26	58.82± 2.04	0.97± 0.01
LW20	73.48± 10.88	59.78± 0.84	0.99± 0.00
LW25	89.89± 23.034	58.68± 1.35	0.97± 0.01
LW26	82.94± 16.85	60.26± 0.24	1.80± 1.45
LS1	71.18± 6.90	61.23± 4.25	0.97± 0.01
LS7	77.35± 10.58	60.06± 3.01	0.98± 0.02

สรุป

จากการทดลองคัดแยกแบคทีเรียได้ทั้งหมด 38 ไอโซเลท โดยคัดแยกแบคทีเรียจากตะกอนจุลินทรีย์ได้ 12 ไอโซเลท ได้แก่ LS1- LS12 และแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากตัวอย่างบ่อเติมอากาศของระบบแอคทิเวเต็ดสลัดจ์ คัดแยกได้ 26 ไอโซเลท ได้แก่ LW1- LW26 แบคทีเรียที่ให้ผลบวกในผลิตเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac ได้ทั้ง 3 ชนิด โดยวิธี plate assay มีจำนวน 9 ไอโซเลท คือไอโซเลท LW3, LW4, LW9, LW12, LW20, LW25, LW26, LS1 และLS7 เมื่อนำไปวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ LiP พบว่าไอโซเลท LW4 มีค่ากิจกรรมเอนไซม์สูงที่สุดเท่ากับ 90.45± 17.96 ยูนิตต่อลิตร กิจกรรมเอนไซม์ MnP พบว่าไอโซเลท LS1 มีค่ากิจกรรมเอนไซม์สูงที่สุดเท่ากับ 61.23± 4.25 ยูนิตต่อลิตร และกิจกรรมเอนไซม์ Lac พบว่า ไอโซเลท LW26 มีค่ากิจกรรมเอนไซม์สูงที่สุดเท่ากับ 1.80± 1.45 ยูนิตต่อลิตร

ตามลำดับ จากผลการทดลองในการคัดแยกแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์กลุ่ม ligninolytic enzyme ประกอบด้วยเอนไซม์ LiP, MnP และ Lac และสามารถนำแบคทีเรียดังกล่าวไปใช้ในการบำบัดลิกนินในระดับห้องปฏิบัติการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดลิกนินในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของอุตสาหกรรมกระดาษต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษาประจำปีการศึกษา 2559 และขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ปีการศึกษา 2558 จากมหาวิทยาลัยพะเยา

เอกสารอ้างอิง

ปฏิมา เมษประสาท. 2551. **ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพในอุตสาหกรรมเกษตร**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมลคลธัญบุรี.

พิชญ์สินี โพธิจิตติ. 2560. **อุตสาหกรรมกระดาษและผลิตภัณฑ์กระดาษ**. หน่วยวิเคราะห์เศรษฐกิจภาคการผลิต ส่วนเศรษฐกิจรายสาขา ศูนย์วิจัยเศรษฐกิจ ธุรกิจ และเศรษฐกิจฐานราก ธนาคารออมสิน.

Arora, D.S., M. Chander and P.K. Gill. 2002. Involvement of lignin peroxidase, manganese peroxidase and laccase in degradation and selective ligninolysis of wheat straw. **International Biodeterioration and Biodegradation** 50 (2): 115-120.

Chandra, R., A. Raj, H.J. Purohit and A. Kapley. 2007. Characterisation and optimisation of three potential aerobic bacterial strains for kraft lignin degradation from pulp paper waste. **Chemosphere** 67(4): 839-846.

Chandra, R. and R. Singh. 2012. Decolourisation and detoxification of rayon grade pulp paper mill effluent by mixed bacterial culture isolated from pulp paper mill effluent polluted site. **Chemical Engineering Journal** 61: 49-58.

Chandra, R., R. Singh and S. Yadav. 2011. Effect of bacterial inoculum ratio in mixed culture for decolourization and detoxification of pulp paper mill effluent. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology** 87 (3): 436-444.

Ko, J.J., Y. Shimizu, K. Ikeda, S.K. Kim, C.H. Park and S. Matsui. 2009. Biodegradation of high molecular weight lignin under sulfate reducing conditions: lignin degradability and degradation by-products. **Bioresource Technology** 100 (4): 1622-1627.

Li, J., H. Yuan and J. Yang. 2009. Bacteria and lignin degradation. **Frontiers of Biology in China** 4 (1): 29–38.

Patil, S.R. 2014. Production and purification of Lignin Peroxidase from Bacillus megaterium and its application in bioremidation. Journal of Microbiology 3 (1): 22-28.

Picart, P., L. Wiermans, M. P´erez-S´anchez, P.M. Grande, A. Schallmey and P. Dominguez de Maria. 2016. Assessing Lignin Types To Screen Novel Biomass-Degrading Microbial Strains: Synthetic Lignin as Useful Carbon Source. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering** 4: 651-655.

Rahman, N.H.A., N.A.A. Rahman, M. Surainiabdaziz and M. Hassan. 2013. Production of ligninolytic enzymes by newly isolated bacteria from palm oil plantation soils. **Bioresour** 8 (4): 6136-6150.

Renugadevi, R., M.P. Aryyappadas, P.H. Preethy and S. Savetha. 2011. Isolation, screening and induction of mutation in strain for extra cellular lignin peroxidase producing bacteria from soil and its partial purification. **Journal of Research in Biology** 4: 312-318.

Sasikumar, V., V. Priya, C. Shiv Shankar and D. Sathish Sekar. 2014. Isolation and Preliminary Screening of Lignin Degrading Microbes. **Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)** 3 (6): 291-294.

Shi, Y., L. Chai, C. Tang, Z. Yang, Y. Zheng and Y. Chen. 2013. Biochemical investigation of Kraft lignin degradation by *Pandoraea* sp. B-6 isolated from bamboo slips. **Bioprocess and Biosystems Engineering** 36 (12): 1957-1965.

Silva, I.S., C.R. Menezes, E. Franciscon, E.C. Santon and L.R. Durrant. 2010. Degradation of Lignosulfonic and Tannic Acids by Ligninolytic Soil Fungi Cultivated under Icroaerobic Conditions. **Brazilian Archives of Biology and Technology** 53 (3): 693-699.

Thongkrua, S. 2010. Simultaneous Removal of Lignin and 2, 4- Dichlorophenol In Pulp and Paper Mill Wastewater Using a Supervibration-photocatalytic Reactor. **Modern Applied Science** 5 (1): 92-100.

Verma, M. and A. Ekka. 2016. Decolorization of Kraft Lignin by Ligninolytic Bacterial Isolates from Timber Soils of Raipur, Chhattisgarh. **Inter Technology in Engineering and Science** 4 (10): 230-236.

Yadav, S and R. Chandra. 2015. Syntrophic co-culture of *Bacillus subtilis* and *Klebsiella pneumonia* for degradation of kraft lignin discharged from rayon grade pulp industry. **Journal of Environmental Sciences** 33: 229-238.

องค์ประกอบชนิดอาหารในกระเพาะอาหารของปูก้ามดาบ *Uca forcipata* ในป่าชายเลนบริเวณคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม

Diet Compositions of Fiddler Crab, *Uca forcipata* in Mangrove at Klong Kone and Laem Yai, Samut Songkhram Province

ธีรดา น้อยถนอม[1] วัลฤล จงธนกานต์[1] และ ศิรประภา เปรมเจริญ[1*]

Teerada noitanom[1], Vanlarin Jongthanakaan[1] and Siraprapha Premcharoen[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษาองค์ประกอบชนิดอาหารของปูก้ามดาบในบริเวณป่าชายเลนคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม ทำการเก็บตัวอย่างปูก้ามดาบ 4 ครั้ง ตามฤดูกาล ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2559 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2560 จากปูก้ามดาบทั้งหมด 122 ตัว เป็นปูก้ามดาบเพศผู้ 63 ตัว และปูก้ามดาบเพศเมีย 59 ตัว อัตราส่วนเพศผู้ต่อเพศเมียเท่ากับ 1: 0.94 โดยพบปูก้ามดาบมากที่สุดในเดือนมกราคม โดยค่ามวลชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 10.19 กรัมต่อตารางเมตร ผลจากการศึกษาชนิดของอาหารในกระเพาะอาหารปูก้ามดาบพบดินตะกอน (48.07%) เนื้อเยื่อพืช (33.45%) สาหร่ายขนาดเล็ก (18.28%) นีมาโทด (0.18%) และแอนเนลิด (0.02%) จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออาหารในกระเพาะอาหารของปูก้ามดาบ ได้แก่ เพศ และฤดูกาล พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ผลจากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเฝ้าระวังและติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในแหล่งที่อยู่อาศัยและแหล่งอาหารของปูก้ามดาบ และนำมาใช้ประโยชน์ในทางเศรษฐกิจด้านการเพาะเลี้ยงได้ เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการทรัพยากรปูก้ามดาบในพื้นที่ต่อไป

ABSTRACT

Diet compositions of fiddler crab, *Uca forcipata* in mangrove at Klong Kone and Laem Yai, Samut Songkhram Province was conducted seasonally from April 2016 to January 2017. Totally 122 of fiddler crabs (63 male crabs and 59 female crabs) with the sex ratio of male crabs and female crabs was 1: 0.94. The most abundance of fiddler crab was found in January with the highest biomass of 10.19 grams per square meter. Results from the food content analysis showed that the diets were dominated by sediment (43.85%), plant tissue (36.48%), microalgae (20.29%), nematode (0.20%) and annelid (0.04%). There was no significant difference in the percentage composition of food items with sexes and seasons ($p>0.05$). The results of this study can be used as basic information for surveillance and follow-up of the environment changes on habitats and food sources of fiddler crab. It can also be used in the economy of aquaculture for resource management of fiddler crab in the area.

Key Words: fiddler crab, food types, Klong Kone, Laem Yai

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

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดนครปฐม 73140

[1]Department of Science, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140

คำนำ

ป่าชายเลนเป็นระบบนิเวศที่ประกอบด้วยพืชและสัตว์นานาชนิดดำรงชีวิตร่วมกันในสภาพแวดล้อมที่เป็นดินเลน น้ำกร่อยหรือมีน้ำทะเลท่วมถึงสม่ำเสมอ ดินในป่าชายเลนมีความอุดมสมบูรณ์สูงจากธาตุอาหารที่มาจากการกัดเซาะตามชายฝั่ง แหล่งน้ำลำธาร และสารอินทรีย์จากซากพืชซากสัตว์ในบริเวณป่าชายเลน สัตว์ที่อาศัยอยู่ตามพื้นป่าชายเลนจะต้องมีการปรับตัวอย่างมากเพื่อการอยู่รอด เนื่องจากต้องประสบกับสภาวะต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงอยู่เป็นประจำ เช่น สภาวะที่ทำให้มีการสูญเสียน้ำออกจากลำตัว สภาพอุณหภูมิสูง สภาพที่มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างต่ำของดินเลน และการเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำ ตัวอย่างเช่นปูก้ามดาบซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่สำคัญในป่าชายเลน มีบทบาทสำคัญในห่วงโซ่อาหาร และกระบวนการหมุนเวียนของธาตุอาหาร ซึ่งจะคอยเก็บสารอินทรีย์ขนาดเล็กซึ่งตกตะกอนอยู่บนหาดเลนกินเป็นอาหาร โดยทำการส่งผ่านพลังงานของสารภายในระบบนิเวศป่าชายเลน และช่วยเร่งการย่อยสลายอินทรีย์สาร ทำให้ป่าชายเลนมีความอุดมสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ปูก้ามดาบยังเป็นตัวชี้วัดความอุดมสมบูรณ์ของป่าชายเลน พื้นที่ใดที่มีความสมดุลทั้งดิน น้ำ และพรรณไม้ พื้นที่นั้นจะมีปูก้ามดาบอาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก (ขวัญธิดา และคณะ, 2556)

จังหวัดสมุทรสงครามตั้งอยู่ภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย พื้นที่ส่วนใหญ่ของสมุทรสงครามเป็นที่ราบลุ่มริมทะเล สภาพดินเป็นดินเหนียวปนทราย ในอดีตพื้นที่ป่าชายเลนคลองโคนถูกบุกรุกทำลาย เพื่อนำมาทำนากุ้งและทำประโยชน์อื่น ๆ ทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรทางทะเลใกล้ชายฝั่งได้สูญเสียไป และพื้นที่ป่าชายเลนของตำบลแหลมใหญ่เคยเป็นพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ตลอดแนวชายฝั่งทะเลปากอ่าวแม่กลอง แต่เนื่องจากมีการถูกบุกรุกพื้นที่ป่าเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ และชาวบ้านยังได้ปรับพื้นที่ป่าชายเลนทำเป็นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ต่อมาในพื้นที่เกิดน้ำเน่าเสียเป็นมลภาวะทางทะเล ส่งผลให้สภาพแวดล้อมในพื้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงและเสียสมดุล ซึ่งทำให้มีผลกระทบต่อแหล่งที่อยู่อาศัย แหล่งอาหาร การกระจาย และความหลากหลายของปูก้ามในป่าชายเลน ดังนั้นการศึกษานิสัยการกินอาหารของปูก้ามดาบ ตำบลคลองโคน และแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม ทำให้ทราบถึงการปรับตัวทางสัณฐานวิทยา และลักษณะการกินอาหารของปูก้ามดาบ และยังทราบถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เพื่อเป็นแนวทางแก้ไขปัญหาผลกระทบจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมและจากการกระทำของมนุษย์ และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเฝ้าระวัง และติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ทำการศึกษา

พื้นที่ทำการศึกษาอยู่บริเวณป่าชายเลน ตำบลคลองโคนและแหลมใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม กำหนดจุดเก็บตัวอย่างเป็นแนว 5 สถานี คือ ป่าชายเลนนากุ้ง (KK-1) เป็นป่าชายเลนที่ห่างจากการทำกิจกรรมบ่อกุ้งเพียง 50 เมตร ป่าชายเลนธรรมชาติ (LY-2) เป็นป่าชายเลนบริเวณตำบลแหลมใหญ่ที่แสงแดดส่องถึงบางส่วน ป่าชายเลนบริเวณท่อส่งน้ำมัน (LY-3) ป่าชายเลนธรรมชาติ (KK-4) ที่เป็นพื้นที่โล่งและแสงแดดส่องถึงตลอดเวลา และป่าชายเลนแหล่งชุมชน (KK-5) ซึ่งแต่ละสถานีห่างกันประมาณ 500 - 1,000 เมตร วัดพิกัดทางภูมิศาสตร์โดยใช้ GPS รายละเอียดของพื้นที่แสดงใน Figure 1 โดยกำหนดช่วงระยะเวลาการ

ออกเก็บตัวอย่าง คือ ฤดูแล้ง (เมษายน พ.ศ. 2559) ต้นฤดูฝน (กรกฎาคม พ.ศ. 2559) ปลายฤดูฝน (ตุลาคม พ.ศ. 2559) และช่วงฤดูหนาว (มกราคม พ.ศ.2560)

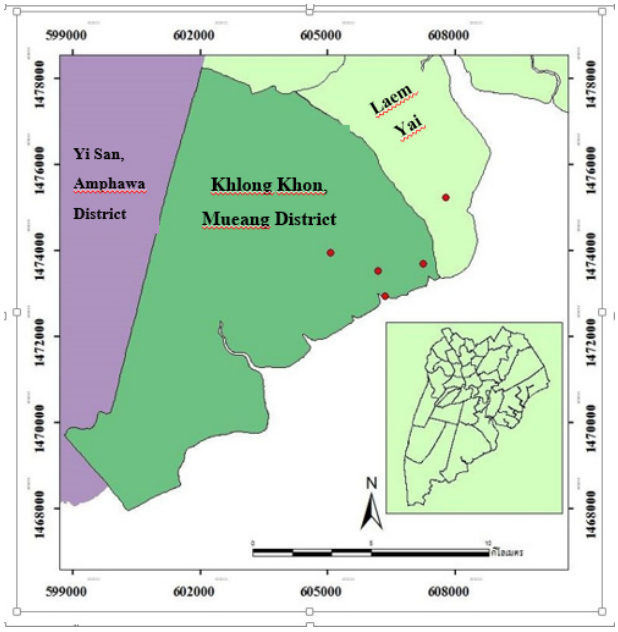


Figure 1 Klong Kone and Laem Yai Subdistricts, Samut Songkhram Province, showing location of sites (•) from which fiddler crab samples were collected.

การเก็บรวบรวมตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างปูก้ามดาบในทุกบริเวณศึกษาโดยใช้ตารางสี่เหลี่ยมนับสัตว์ (quadrat) ขนาด 1 x 1 ตารางเมตร วางสุ่มลงบนพื้นดินในแต่ละบริเวณศึกษาที่กำหนดไว้บริเวณ 6 อัน เก็บตัวอย่างปูก้ามดาบที่มองเห็นในตารางสี่เหลี่ยมนับสัตว์ใส่ถุงพลาสติก แล้วขุดภายในตารางสี่เหลี่ยมนับสัตว์จากผิวดินประมาณ 15 เซนติเมตร นำดินที่ได้ใส่รวมลงในถุงพลาสติกที่เก็บตัวอย่างสัตว์ในตอนแรก นำดินที่ได้มาร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดตา 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างปูก้ามดาบที่ได้ใส่รวมลงในถุงพลาสติก แต่ละถุงที่ได้มาดองด้วยน้ำยาฟอร์มาลิน 10 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างปูก้ามดาบที่ได้นำมานับจำนวนและชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นและมวลชีวภาพ การหามวลชีวภาพทำโดยการใช้กระดาษซับตัวอย่างปูก้ามดาบที่เปียกน้ำให้แห้งก่อนที่จะนำไปชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้จะเป็นน้ำหนักสดเมื่อคูณน้ำหนักสดด้วย dry weight conversion factor ของปูก้ามดาบซึ่งมีค่าเท่ากับ 17 แล้วหารด้วย 100 ก็จะเป็นน้ำหนักแห้งของปูก้ามดาบ

การศึกษาองค์ประกอบอาหารจากกระเพาะอาหารของปูก้ามดาบ

นำตัวอย่างปูก้ามดาบมาทำการศึกษาองค์ประกอบอาหารจากกระเพาะอาหารของปูก้ามดาบ โดยใช้ปิเปตปลายตัด หรือหลอดฉีดยาดูดตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร หยดลงในสไลด์นับจำนวน จากนั้นทำสไลด์ถาวร (permanent slide) โดยเกลี่ย (smear) ตัวอย่างอาหารกับกลีเซอรีนในสไลด์หลุมปิดด้วยแผ่นปิดสไลด์ (cover glass) ทาขอบแผ่นปิดสไลด์ให้ติดกับสไลด์ด้วยยาทาเล็บ นำสไลด์ถาวรมาวิเคราะห์ชนิดอาหารด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงตั้งแต่ 100 หรือ 400 เท่า เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของอาหารของปูก้ามดาบที่ศึกษาจากกระเพาะอาหารโดยวิธี Points method ตามวิธีการศึกษาของ Hynes (1950) ส่วนเอกสารที่ใช้ประกอบการ

จำแนกกลุ่มตัวอย่างสิ่งมีชีวิตที่พบในกระเพาะอาหารของปูก้ามดาบ กลุ่มสัตว์หน้าดินขนาดเล็กจะใช้เอกสารของ Kensley and Schotte (1989) และลัดดา (2542) ส่วนสาหร่ายจะใช้เอกสารของนิรุชา (2547)

การวิเคราะห์ข้อมูล

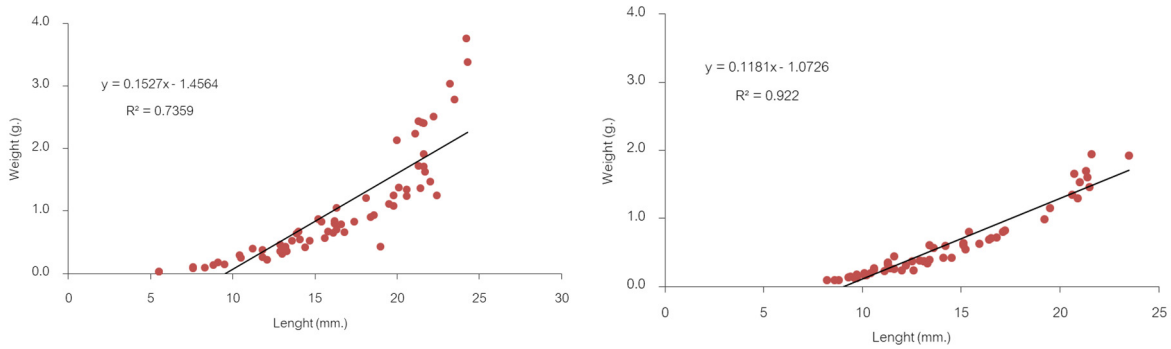
นำข้อมูลความหนาแน่นและมวลชีวภาพของปูก้ามดาบมาวิเคราะห์หาความแตกต่างและนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบในแต่ละฤดูกาลโดยใช้ ANOVA สำหรับข้อมูลความกว้างของกระดอง ความยาวของกระดองในปูเพศผู้และเพศเมีย โดยการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (correlation coefficient; r) รวมทั้งศึกษาอัตราส่วนเพศของปูก้ามดาบ

ผลและวิจารณ์

จากตัวอย่างปูก้ามดาบที่รวบรวมในระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2559 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2560 ได้ก้ามดาบทั้งหมด 122 ตัว ประกอบด้วยปูก้ามดาบเพศผู้จำนวน 63 ตัว และปูก้ามดาบเพศเมีย 59 ตัว พบว่าปูก้ามดาบเพศผู้มีความยาวกระดองตั้งแต่ 7.6 - 24.3 มิลลิเมตร ความกว้างกระดองตั้งแต่ 11.6 - 40.1 มิลลิเมตร และน้ำหนักตัวตั้งแต่ 0.51 - 22.13 กรัม เพศเมียมีความยาวกระดองตั้งแต่ 8.2-23.5 มิลลิเมตร ความกว้างกระดองตั้งแต่ 12.1-33.2 มิลลิเมตร และน้ำหนักตัวตั้งแต่ 0.53 – 11.43 กรัม อัตราส่วนระหว่างเพศผู้ต่อเพศเมียของปูก้ามดาบ *Uca forcipata* ที่พบในป่าชายเลนบริเวณคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม เท่ากับ 1: 0.94 ซึ่งสอดคล้องกับ กิตติมา (2526) ศึกษาชีววิทยาบางประการของปูก้ามดาบ *Uca forcipata* และ *Uca spinata* บริเวณป่าชายเลนบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ได้รายงานว่า อัตราส่วนเพศผู้ต่อเพศเมียของปูก้ามดาบ *Uca forcipata* และ *Uca spinata* เท่ากับ 1: 0.83 และ 1: 0.5 ตามลำดับ เนื่องมาจากลักษณะทางชีววิทยา เช่น อัตราการเจริญเติบโต อัตราการตาย การทดแทนที่ของประชากร การถูกล่า การรอดตายระหว่างการอพยพ และการสืบพันธุ์ รวมถึงความสามารถในการต่อสู้ที่แตกต่างกันระหว่างปูก้ามดาบเพศผู้และเพศเมีย ปูก้ามดาบเพศผู้มีก้ามขนาดใหญ่สามารถต่อสู้กับศัตรูได้ดีกว่าปูก้ามดาบเพศเมียที่มีก้ามขนาดเล็ก ทำให้ปูก้ามดาบเพศผู้มีอัตราการรอดตายมากกว่าเพศเมีย (Koch *et al.,* 2005)

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวและน้ำหนัก

ผลจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวกระดองและน้ำหนัก มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ในปูก้ามดาบเพศผู้และเพศเมียเท่ากับ 0.7359 และ 0.9220 ตามลำดับ แสดงว่าความยาวกระดองกับน้ำหนักตัวของปูก้ามดาบทั้งสองเพศมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน **(**Figure 2) สอดคล้องกับ Okon and Sikoki (2014) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวกระดองและน้ำหนักตัวและปัจจัยสิ่งแวดล้อมของ *Uca tangeri* ในแม่น้ำเอ็มโบ ประเทศไนจีเรีย ได้รายงานว่า ความยาวกระดองกับน้ำหนักตัวของปูก้ามดาบ *Uca tangeri* มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน และ Oluwatoyin *et al.* (2013) ศึกษาความสัมพันธ์ของน้ำหนักตัวและขนาดของปู ได้รายงานว่า นอกจากความยาวกระดองสัมพันธ์กับน้ำหนักตัวแล้ว ความกว้างกระดองยังสัมพันธ์กับน้ำหนักของปูเช่นกัน



(a) (b)

Figure 2 Length - weight relationships of fiddler crab *(Uca forcipata)*
(a) male (b) female

ฤดูกาลที่พบปูก้ามดาบ

จากการเก็บตัวอย่างปูก้ามดาบบริเวณป่าชายเลนคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม จากตัวอย่างปูที่รวบรวมในระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2559 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2560 ผลพบว่าในเดือนมกราคม (ช่วงฤดูหนาว) พบปูก้ามดาบมากที่สุด คือ 63 ตัว คิดเป็นร้อยละ 51.64 ของปูก้ามดาบที่พบทั้งหมด เป็นเพศผู้ 40 ตัว และเพศเมีย 23 ตัว คิดเป็นร้อยละ 63.49 และ 36.51ตามลำดับ ส่วนเดือนตุลาคม (ช่วงปลายฤดูฝน) พบปูก้ามดาบน้อยที่สุด คือ 1 ตัว คิดเป็นร้อยละ 0.82 ของปูก้ามดาบที่พบทั้งหมด (Figure 3) สอดคล้องกับการศึกษาการแบ่งเขต และการกระจายของปู บริเวณป่าชายเลนปิฉะวรัม ทางชายฝั่งตะวันออกเฉียงใต้ ประเทศอินเดีย ของ Ravichandran *et al.* (2001) พบว่า ในช่วงเดือนมกราคมพบปูแสมก้ามยาว *Metaplex elegans* มากที่สุด คือ 13 ตัว คิดเป็นร้อยละ 20.00 ของปูแสมก้ามยาวทั้งหมด

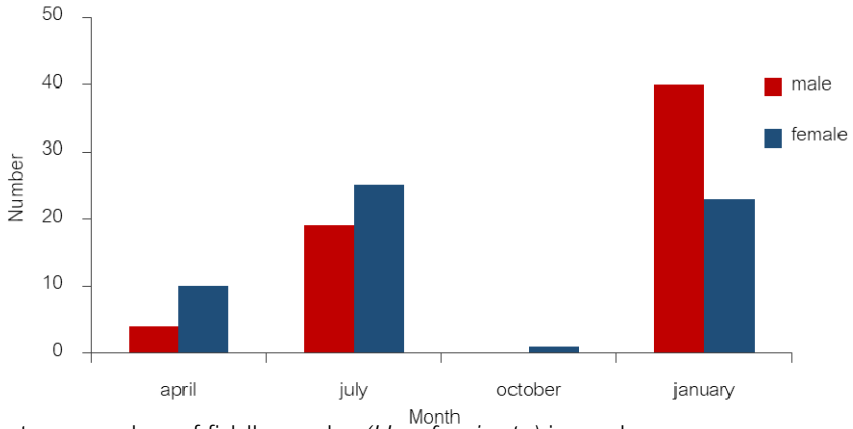


Figure 3 Percentage number of fiddler crabs *(Uca forcipata)* in each season.

มวลชีวภาพของปูก้ามดาบ

มวลชีวภาพของปูก้ามดาบ *Uca forcipata* บริเวณคลองโคนและแหลมใหญ่ ในเดือนเมษายนมีค่าเท่ากับ 3.70 กรัมต่อตารางเมตร เดือนมิถุนายนมีค่าเท่ากับ 6.33 กรัมต่อตารางเมตร เดือนตุลาคมมีค่าเท่ากับ 0.05 กรัมต่อตารางเมตร และเดือนมกราคมมีค่าเท่ากับ 10.19 กรัมต่อตารางเมตร โดยในเดือนมกราคมมีค่ามวลชีวภาพสูงสุด (Table 1) มวลชีวภาพปูก้ามดาบที่พบระหว่างฤดูกาลเมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทางสถิติ ($p>0.05$)

Table 1 Total biomass of fiddler crab *(Uca forcipata)* in each season

Month	Study Areas		
	Klong Kone (KK)	Laem Yai (LY)	Klong Kone and Laem Yai (KK and LY)
April	3.70	-	3.70
July	5.16	1.18	6.33
October	-	0.05	0.05
January	8.34	1.85	10.19

การศึกษาชนิดของอาหารในกระเพาะอาหารของปูก้ามดาบ

ผลการศึกษาชนิดของอาหารในกระเพาะปูก้ามดาบบริเวณป่าชายเลนคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2559 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2560 จากตัวอย่างปูก้ามดาบจำนวน 122 ตัว พบว่าองค์ประกอบของอาหารในกระเพาะ ได้แก่ ตะกอนดิน (detritus) มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 48.07 ของอาหารในกระเพาะทั้งหมด รองลงมา คือ เนื้อเยื่อพืช (plant tissue) และสาหร่ายขนาดเล็ก (algae) คิดเป็นร้อยละ 33.45 และ 18.28 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบเนมาโทด (nematode) และแอนเนลิด (annelid) คิดเป็นร้อยละ 0.18 และ 0.02 ตามลำดับ (Figure 4 and 5) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอาหารที่เป็นพืชและสัตว์กับปริมาณดินตะกอนภายในกระเพาะอาหาร พบว่าปูก้ามดาบกินอาหารพวกพืชและสัตว์น้อยกว่าดินตะกอน สอดคล้องกับ Kristensen and Kristensen (2010) ศึกษาการแบ่งส่วนทรัพยากรอาหารของปูในป่าชายเลนบางโรง จังหวัดภูเก็ต ได้รายงานว่า ใบไม้โกงกางเป็นอาหารชนิดหลักของปูในป่าชายเลน เนื่องจากมีไนโตรเจนสูงซึ่งเป็นธาตุอาหารที่สำคัญในการเจริญเติบโตของปู และสอดคล้องกับการศึกษาการเลือกกินอาหารของปูในป่าชายเลนกับสารประกอบไนโตรเจน เกาะชวา ประเทศอินโดนีเซีย ของ Nordhaus (2011) พบว่าปูเลือกกินซากพืชมากกว่าสาหร่ายและสัตว์ และได้ทำการทดลองให้อาหารใบไม้ที่มีสีเขียว เหลืองและน้ำตาล พบว่ามีอัตราการบริโภคใบไม้สีน้ำตาลมากที่สุด เนื่องจากมีสารประกอบไนโตรเจนสูง และเมื่อเปรียบเทียบการกินอาหารในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบชนิดอาหารในกระเพาะอาหารของปูก้ามดาบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบชนิดอาหารในกระเพาะของปูก้ามดาบ บริเวณป่าชายเลนคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม จากตัวอย่างปูก้ามดาบทั้งหมด 122 ตัว ระหว่างเพศผู้และเพศเมีย พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยในเพศผู้และเพศเมีย องค์ประกอบของอาหารที่พบมีตะกอนดิน (detritus) มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 53.51 และ 40.99 ตามลำดับ รองมาลง คือ เนื้อเยื่อพืช สาหร่ายขนาดเล็ก เนมาโทด และแอนเนลิด (Table 2) สอดคล้องกับการศึกษาของ Islam and Makoto (2010) ศึกษาการเลือกกินอาหาร และวัสดุหรือสารอินทรีย์ของปูแสม *Perisesarma bidens* บริเวณป่าชายเลนซาชิกิ ทางตอนใต้ ประเทศญี่ปุ่น พบว่าองค์ประกอบของอาหารในกระเพาะระหว่างเพศผู้และเพศเมียไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

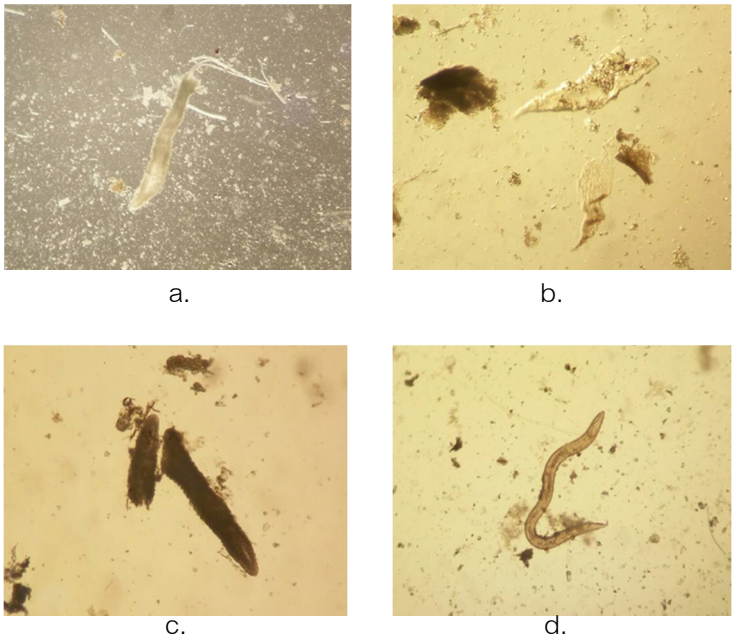


Figure 4 Dominant food types in stomachs of *Uca forcipata*; a-b. plant tissue c. oligocheate d. heterakidae

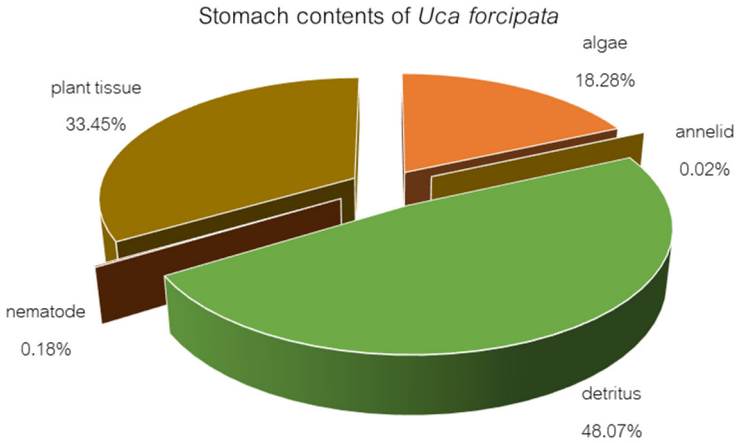


Figure 5 Percentages of food type in stomachs of *Uca forcipata* in mangrove at Klong Kone and Laem Yai, Samut Songkhram Province

Table 2 Percentages of food type in stomachs of *Uca forcipata* in mangrove at Klong Kone and Laem Yai, Samut Songkhram Province between male and female

Prey items	Percentages of Food (%)	
	Male	Female
detritus	53.51	40.99
plant tissue	29.46	38.65
algae	16.68	20.37
nematode	0.31	0.00
annelid	0.04	0.00

ผลการศึกษาองค์ประกอบชนิดอาหารในกระเพาะของปูก้ามดาบ บริเวณป่าชายเลนคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม จากตัวอย่างปูก้ามดาบทั้งหมด 122 ตัว ในแต่ละฤดูกาลพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยพบว่าในช่วงปลายฤดูฝน (ตุลาคม พ.ศ. 2559) องค์ประกอบของอาหารที่พบมีตะกอนดินมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 50.00 รองมาลง คือ ในช่วงต้นฤดูฝน (กรกฎาคม พ.ศ. 2559) คิดเป็นร้อยละ 49.17 ของอาหารในกระเพาะทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษานิสัยการกินอาหารของปูทะเล *Portunus pelagicus* ตามแนวชายฝั่งของดาร์เอสซาลาม สหสาธารณรัฐแทนซาเนีย ของ Chande and Mgaya (2004) พบว่าองค์ประกอบของอาหารในกระเพาะอาหารในแต่ละฤดูกาล ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และสอดคล้องกับการศึกษาของ อนัญญา (2557) พบตะกอนดิน ในช่วงฤดูฝนมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 21.64 โดยในฤดูแล้ง และช่วงต้นฤดูฝน เนื้อเยื่อพืช สาหร่ายขนาดเล็ก และเนมาโทด มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันอีกด้วย (Table 3)

Table 3 Percentages of food type in stomachs of *Uca forcipata* in mangrove at Klong Kone and Laem Yai, Samut Songkhram Province in each season

Prey items	Percentages of Food (%)			
	April	July	October	January
detritus	43.75	49.17	50.00	48.32
plant tissue	49.17	32.92	35.00	30.96
algae	7.08	17.42	15.00	20.61
nematode	0.00	0.50	0.00	0.07
annelid	0.00	0.00	0.00	0.04

สรุป

จากการศึกษาองค์ประกอบประชากรปูก้ามดาบในป่าชายเลนคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม พบปูก้ามดาบ *Uca forcipata* เป็นชนิดเด่น ซึ่งสามารถพบได้ทั้ง 4 ฤดูกาล จากตัวอย่างปูก้ามดาบที่รวบรวมในระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2559 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2560 พบปูก้ามดาบทั้งหมด 122 ตัว เป็นปูก้ามดาบเพศผู้ 63 ตัว และปูก้ามดาบเพศเมีย 59 ตัว อัตราส่วนเพศพบว่ามีอัตราส่วนเพศผู้ต่อเพศเมียเท่ากับ 1: 0.94 และปูก้ามดาบมีความหนาแน่นสูงสุดในช่วงเดือนมกราคม (ช่วงฤดูหนาว) ซึ่งปูก้ามดาบจะพบมากในพื้นที่โล่งแจ้ง มวลชีวภาพของปูก้ามดาบในเดือนมกราคมมีค่ามวลชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 10.19 กรัมต่อตารางเมตร ผลจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวและน้ำหนักตัวของเพศเมีย จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวและน้ำหนักมากที่สุด การศึกษาชนิดของอาหารในกระเพาะอาหารของปูก้ามดาบ ภายในกระเพาะอาหาร พบว่ามีดินตะกอนมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 48.07 ของอาหารทั้งหมดในกระเพาะอาหาร รองลงมา คือ เนื้อเยื่อพืช (plant tissue) นอกจากนี้ยังพบสาหร่ายขนาดเล็ก (algae) เนมาโทด (nemathod) และแอนเนลิด (annelid) ในกระเพาะอาหารอีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปูก้ามดาบสามารถกินทั้งพืชและสัตว์ (omnivore) และสามารถกินอินทรียสารตามผิวตะกอนดิน โดยพบตะกอนดิน และเนื้อเยื่อพืชเป็นองค์ประกอบหลัก แสดงให้เห็นถึงบทบาทในห่วงโซ่อาหารแบบ detritus food chain ซึ่งจะเป็นตัวคอยเก็บซากใบไม้ต่าง ๆ ที่ร่วงหล่นในป่าชายเลน ทำให้มี

การหมุนเวียนของสารอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาองค์ประกอบชนิดอาหารในกระเพาะอาหารของปูก้ามดาบ *Uca forcipata* ในป่าชายเลนบริเวณคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำมาเพาะเลี้ยงปูก้ามดาบ เพื่อทดแทนประชากรปูในแหล่งธรรมชาติ และเป็นอาชีพทางเลือกแก่คนในชุมชนและชาวประมง ช่วยสร้างรายได้ให้กับคนในชุมชน และเป็นอาชีพทางเลือกทั้งอาชีพหลักและอาชีพรองให้กับชุมชนได้เป็นอย่างดีและยั่งยืน รวมถึงนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางการอนุรักษ์ เฝ้าระวังและติดตามการเปลี่ยนแปลงความอุดมสมบูรณ์ในแหล่งที่อยู่อาศัยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปี 2560 และขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำหรับสถานที่ปฏิบัติงานและวิเคราะห์ตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

กิตติมา พาหุรัตน์. 2526. **การศึกษาพฤติกรรมและนิเวศวิทยาบางประการของปูก้ามดาบสอง ชนิด *Uca* (Deltuca) *forcipata* (Adams and White, 1848) และ *Uca* (Deltuca) *dussumieri spinata* (H. Milne-Edwards, 1852).** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ขวัญธิดา ศรีวัลลภ, ณัฐกิจ จูเปี้ยว และแพรวพรรณ ปุจฉาการ. 2556. **ป่าชายเลน**. ม.ป.ท.

นิรุชา มงคลแสงสุรีย์ . 2547. **ความหลากหลายของชนิดและมวลชีวภาพของสาหร่ายหน้าดินขนาดเล็กบริเวณป่าชายเลนบ้านคลองโคน จังหวัดสมุทรสงคราม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

ลัดดา วงศ์รัตน์. 2542. **แพลงก์ตอนพืช**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อนัญญา เจริญพรนิพทธ. 2557. **ชนิดของอาหารและการเติบโตของปูแสม สกุล *Episesarma* และ *Perisesarma* ในอ่าวบ้านดอน จังหวัดสุราษฎร์ธานี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.

Chande, A. I. and Y. D. Mgaya. 2004. Food Habits of the Blue Swimming Crab *Portunus pelagicus* along the Coast of Dar es Salaam, Tanzania. **The Western Indian Ocean Journal of Marine Science** 3 (1): 37-42.

Hynes, H. B. N. 1950. The food of fresh water stickleback (*Gasterosteus aculeatus* and *Pygosteus pungitius*), with a review of methods used in studies of the food of fishes. **Journal of Animal Ecology** 19: 36-58.

Islam, S. S. M. and M. Tsuchiya. 2010. Feeding Choice and the Fate of Organic Materials Consumed by Sesarma Crabs Perisesarma bidens (De Haan) When Offered Different Diets. **Journal of Marine Biology** 2010: 1-9.

Kensley, B. and M. Schotte. 1989. **Guide to the Marine Isopod Crustaceans of the Caribbean.** Smithsonian Institution Press, Washington and London.

Koch, V., M. Wolff and K. Diele. 2005. Comparative population dynamics of four fiddler crabs (Ocypodidae, genus *Uca*) from a North Brazilian mangrove ecosystem. **Marine Ecology Progress Series** 291: 177-188.

Kristensen, D. K. and E. Kristensen. 2010. Food partitioning of leaf-eating mangrove crabs (*Sesarminae*): Experimental and stable isotope (^{13}C and ^{15}N) evidence. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 87(4):589-590.

Nordhaus, I. 2011. Food preferences of mangrove crabs related to leaf nitrogen compounds in the Segara Anakan Lagoon, Java, Indonesia. **Journal of Sea Research** 65(4): 414-426.

Okon, E. A. and F. D. Sikoki. 2014. Length-Weigth Relationship and Condition Factor of the West African Fiddler crab *(Uca tangeri)* in Mbo River, Akwalbom State, Nigeria. **Journal of Natural Sciences Research** 4: 33-41.

Oluwatoyin, A., A. Akintade, C. Edwin and K. Victor. 2013. A Study of Length-Weight Relationship and Condition Factor of West African Blue Crab *(Callinectes pallidus)* from Ojo Creek, Lagos, Nigeria. **American Journal of Research Communication** 1(3): 102-114.

Ravichandran, S., P. Soundarapandian and T. Kannupandi. 2001. Zonation and distribution of crabs in Pichavaram mangrove swamp, southeast coast of India. **Indian Journal of Fisheries** 48(2): 221-226.

ปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากการชะละลายของใบไม้จากต้นแสมขาว

Abundance and Form of Phosphorus Leaching from *Avicennia alba* Leaves

กุลกานต์ ช่วยบำรุง[1*] และ มารุต สุขสมจิตร[2]

Koonlagarn Chuaybumrung[1*] and Marut Suksomjit[2]

บทคัดย่อ

ป่าชายเลนเป็นแหล่งเก็บกักและปลดปล่อยธาตุอาหารของระบบนิเวศผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การชะละลาย ปัจจุบันมีการศึกษาการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากป่าชายเลนจำนวนมากแต่ข้อมูลรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยมีอยู่น้อยมาก การศึกษาในครั้งนี้จึงศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสรูปแบบต่าง ๆ ที่ปลดปล่อยผ่านการชะละลายใบแสมขาวซึ่งเป็นพันธุ์ไม้สำคัญในป่าชายเลน (ใบเหลืองและใบเขียว) ผลการศึกษาพบว่าใบแสมขาวทั้งใบเหลืองและใบเขียวมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสผ่านกระบวนการชะละลาย โดยปริมาณ TP ที่ปลดปล่อยจากใบเขียวมีค่ามากกว่าใบเหลืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และส่วนใหญ่อยู่ในรูป TDP โดยรูปแบบของ TDP ที่พบส่วนใหญ่อยู่ในรูป DIP ขณะที่ปริมาณ TPP ที่ปลดปล่อยจากใบเหลืองและใบเขียวในรูป PIP และ POP มีค่าไม่แตกต่างกัน และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้มาหาปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมพบว่ามีการปลดปล่อย TP จากใบแสมขาวผ่านกระบวนการชะละลายเท่ากับ 0.18 กรัม-ฟอสฟอรัส/ตารางเมตร/ปี ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่ามีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสรูปแบบต่าง ๆ ผ่านการชะละลายจากใบแสมขาวออกสู่สิ่งแวดล้อม

ABSTRACT

Mangrove forest is the sink and source of nutrients of the ecosystem through the several processes, i.e. leaching process. Several studies of the abundance of phosphorus loading from mangrove were conduct but the form of phosphorus is rarely study. This study investigated the abundance of phosphorus and its form leaching from *Avicennia alba* (yellow and green) leaves, dominant species in mangrove forest. Significant amounts of phosphorus were leached from *Avicennia alba* leaves. Higher TP concentrations were found in green leave and significantly ($P<0.05$) higher than yellow (senescence) leave. Within TP pool, TDP was the dominant form and high proportion of DIP was found. Within the TPP pool, the proportion of PIP and POP was similar. Form our finding, the amount of TP leached from *Avicennia alba* leaves is 0.18 g-P/m^2/year. Our finding provide a better understanding of the amount and role of phosphorus leaching from *Avicennia alba* leave.

Key Words: leaching process, phosphorus, *Avicennia alba*, lifespan

*Corresponding author; e-mail address: **ployenvi@hotmail.com**

[1]มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) คลองหลวง ปทุมธานี 12120

[1]Thammasat University (Rangsit center), Klong Luang, Patumtani 12120

[2]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) คลองหลวง ปทุมธานี 12120

[2]Faculty of Science and Technology, Thammasat University (Rangsit center), Klong Luang, Patumtani 12120

คำนำ

ป่าชายเลน (Mangrove) เป็นป่าที่อยู่ระหว่างทะเลและแผ่นดิน ป่าชายเลนมีประโยชน์ทั้งทางด้านนิเวศวิทยา และการดำรงชีวิตของมนุษย์หลายประการ เช่น เป็นแหล่งอาหาร แหล่งอนุบาล ที่อยู่อาศัยของสัตว์ต่าง ๆ บรรเทาความรุนแรงของคลื่นลม ป้องกันการกัดเซาะชายฝั่ง บรรเทาความเร็วของกระแสน้ำลงทำให้ตะกอนตกทับถมเกิดเป็นแผ่นดินงอกใหม่ รวมทั้งยังทำหน้าที่ดักและกรองสิ่งต่าง ๆ จากบนบกไม่ให้ลงสู่ทะเล (World Wide Fund for Nature, n.d.) นอกจากนี้ป่าชายเลนยังทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บกักและปลดปล่อยธาตุต่าง ๆ โดยต้นไม้ในป่าชายเลนจะดูดซึมธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตไปใช้ในการสร้างใบ กิ่ง ลำต้น และราก และจะปลดปล่อยธาตุต่าง ๆ กลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อใบ กิ่ง ดอก ผล หรือส่วนอื่น ๆ ร่วงหล่นลงสู่ดิน ผ่านกระบวนการชะละลาย (Leaching) การแตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย (Fragmentation) และการย่อยสลาย (Decomposition) โดยผลผลิตซากพืชในป่าชายเลนส่วนใหญ่จะเป็นส่วนของใบมากที่สุด (จิระศักดิ์ และ อภิรักษ์, 2542; สุพรรษา, 2552)

ปัจจุบันมีการศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารจากใบไม้ในป่าชายเลนเป็นจำนวนมาก แต่การศึกษาส่วนใหญ่จะศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารผ่านกระบวนการย่อยสลาย เช่น สุพรรษา (2552) รายงานว่าปริมาณไนโตรเจนรวม และฟอสฟอรัสรวมจากใบที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมีค่าอยู่ในช่วง 10,132 – 13,603 และ 354 – 562 กรัมน้ำหนักแห้ง/ตารางเมตร/ปี ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม Steinke *et al.* (1993) ระบุว่ากระบวนการชะละลายมีความสำคัญต่อการปลดปล่อยธาตุต่าง ๆ ในระบบนิเวศ โดยพบว่าฟอสฟอรัสในใบแสมทะเลจะถูกชะละลายออกมามากถึงร้อยละ 57-87

จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากใบไม้ในป่าชายเลนผ่านกระบวนการชะละลาย และเนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นหนึ่งในธาตุที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต เป็นองค์ประกอบของดีเอ็นเอ และอาร์เอ็นเอ รวมทั้งสารที่จำเป็นต่อการดำรงชีพอื่น ๆ (Marschner, 2012) นอกจากนี้ฟอสฟอรัสยังเป็นปัจจัยจำกัด (Limiting factor) ซึ่งควบคุมปริมาณผู้ผลิตขั้นต้นในแหล่งน้ำ และมีอิทธิพลต่อวัฏจักรชีวธรณีเคมีของธาตุอาหารอื่น ๆ เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน (Lin and Guo, 2016; Lin *et al.*, 2016) ข้อมูลที่ได้ทำให้ทราบถึงปริมาณของฟอสฟอรัสที่จะปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตและการเปลี่ยนแปลงในระบบนิเวศป่าชายเลนดังกล่าวข้างต้น นอกจากนี้รูปแบบของฟอสฟอรัสที่พบจะทำให้เข้าใจบทบาทของฟอสฟอรัสในสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

สถานที่เก็บตัวอย่าง

ศูนย์ศึกษาธรรมชาติและอนุรักษ์ป่าชายเลนเพื่อการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ จังหวัดชลบุรี

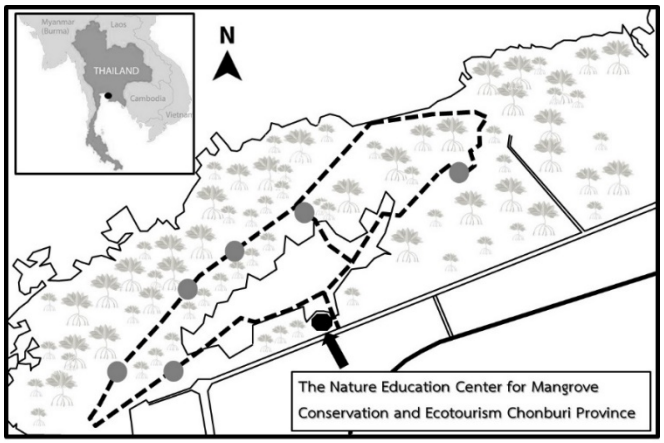


Figure 1 A map showing the location of The Nature Education Center for Mangrove Conservation and Ecotourism in Chonburi Province. Map not to scale. There are 6 sample point. It show in gray color circle.

วิธีการเก็บตัวอย่าง

สุ่มเก็บตัวอย่างใบแสมขาว (*Avicennia alba*) ในเดือนมกราคม พ.ศ. 2559 โดยแบ่งใบแสมขาวออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ใบเหลือง (ใบที่ร่วงหล่น) และใบเขียว (ใบคู่ที่ 3 ที่ติดอยู่กับกิ่งบนลำต้น) จากนั้นทำการคัดเลือกเฉพาะใบแสมขาวที่มีขนาดใกล้เคียงกันไว้ทำการทดลอง เก็บตัวอย่างใบไม้ในที่มืด ชื้น และเย็นระหว่างการขนส่งใบไม้กลับมายังห้องปฏิบัติการนิเวศวิทยาทางทะเล สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

การศึกษาการชะละลายฟอสฟอรัส

แบ่งตัวอย่างใบเหลืองและใบเขียวที่ผ่านการคัดขนาดเรียบร้อยแล้วออกเป็นชุด ๆ กลุ่มละ 15 ชุด ชั่งน้ำหนักใบไม้โดยแต่ละชุดต้องมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 10 $\pm$ 0.5 กรัม บันทึกน้ำหนัก นำตัวอย่างใบไม้จำนวน 3 ชุดไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงเพื่อหาน้ำหนักแห้งของใบไม้ จากนั้นนำใบไม้แต่ละชุดที่เหลืออยู่แช่ในขวดแก้วที่มีน้ำทะเลธรรมชาติ (กรองผ่านกระดาษกรอง GF/C เพื่อกำจัดสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก) เติมสาร NaN_3 (1%) เพื่อควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ในน้ำทะเล ตามวิธีการของ Davis *et al.* (2003) ก่อนนำตัวอย่างไปบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) กำหนดอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 30 $\pm$ 0.5 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง

สุ่มเก็บตัวอย่างครั้งละ 3 ขวด ในวันที่ 1, 5, 10, และ 21 ของการทดลอง กรองตัวอย่างน้ำแต่ละขวดทันทีด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Whatman GF/F) ขนาด 47 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่อาจตกค้างอยู่บนกระดาษกรอง บันทึกปริมาตรน้ำที่กรอง นำกระดาษกรองซึ่งมีตัวอย่างตะกอนแขวนลอยติดอยู่ไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปเก็บในโถดูดความชื้น นำตัวอย่างน้ำที่กรองได้ใส่ในขวดแก้วสีชาและนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เครื่อง

แก้วและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้จะต้องผ่านการล้างทำความสะอาดและกลั้วด้วยกรด HCl 1 นอร์มอล นาน 24 ชั่วโมง

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

วิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปสารละลายทั้งหมด (total dissolved phosphorus; TDP) ในตัวอย่างน้ำที่กรองได้ ตามวิธีของ Huang and Zhang (2009) โดยเติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 5% ในน้ำตัวอย่าง และนำไปย่อยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 16 ชั่วโมงในตู้อบลมร้อน จากนั้นนำไปวัดปริมาณฟอสเฟตตามวิธีการของ Murphy and Riley (1962); Parsons *et al.* (1984) โดยใช้เทคนิควิธีโมลิบดินัมบลู ในส่วนของปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในรูปสารละลาย (dissolved inorganic phosphorus; DIP) สามารถวัดได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการย่อย ในส่วนของปริมาณฟอสฟอรัสอินทรีย์ในรูปสารละลาย (dissolved organic phosphorus ; DOP) จะเท่ากับผลต่างระหว่างค่า TDP และ DIP

วิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (total particulate phosphorus; TPP) โดยนำกระดาษกรองแผ่นแรกไปเผาที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ก่อนนำไปสกัดด้วยกรด HCl เข้มข้น 1 นอร์มอล นาน 12-16 ชั่วโมง (Aspila *et al.*, 1976; Loh and Bauer, 2000; Suzumura *et al.*, 2004) นำสารที่สกัดได้ไปตรวจวัดปริมาณฟอสเฟตตามวิธีการของ Murphy and Riley (1962); Parsons *et al.* (1984) โดยใช้เทคนิควิธีโมลิบดินัมบลู ในขณะเดียวกันนำตัวอย่างที่ติดบนกระดาษกรองอีกแผ่นหนึ่งไปดำเนินการเช่นเดียวกับรายละเอียดข้างต้นแต่ตัดขั้นตอนการเผาออก ค่าที่ตรวจวัดได้จะเท่ากับปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในรูปตะกอนแขวนลอย (particulate inorganic phosphorus; PIP) คำนวณค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสอินทรีย์ในรูปตะกอนแขวนลอย (particulate organic phosphorus; POP) โดยจะเท่ากับผลต่างระหว่างค่า TPP และ PIP

คำนวณปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus; TP) จากผลรวมระหว่าง TDP และ TPP (หักค่า TDP และ TPP ที่มีอยู่ในน้ำทะเลที่ใช้ในการทดลอง) และคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากกระบวนการชะละลายใบแสมขาวทั้ง 2 ช่วงอายุที่ออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยนำปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดคูณด้วยอัตราการร่วงหล่นของใบไม้ในพื้นที่ศึกษา โดยใช้ผลการศึกษาของสุพรรษา (2552) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 475.16 กรัมน้ำหนักแห้ง/ตารางเมตร/ปี

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการชะละลายใบไม้แต่ละช่วงอายุ ด้วยวิธี paired t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม Microsoft excel 2010

ผลและวิจารณ์

ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อย

ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ใบแสมขาวทั้งใบเหลืองและใบเขียวมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสผ่านกระบวนการชะละลาย โดยในวันที่ 1 ของการทดลอง ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus; TP) ที่

ปลดปล่อยจากใบเหลืองและใบเขียวมีค่าเท่ากับ 375.10 และ 166.99 ไมโครกรัม-ฟอสฟอรัส/กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณ TP ที่ปลดปล่อยจากใบเหลืองและใบเขียวในวันที่ 21 ของการทดลองมีค่าเท่ากับ 500.93 และ 779.41 ไมโครกรัม-ฟอสฟอรัส/กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Steinke *et al.* (1993) ที่พบว่ามีการปลดปล่อย TP ผ่านกระบวนการการชะละลายใบของต้นแสมทะเล (*Avicennia marina* (Forrsk) Vierh) ถึงร้อยละ 57-87 และการศึกษาของ Davis *et al.* (2003) ที่ศึกษาการชะละลายใบของต้นโกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mangle* L.) และพบว่าปริมาณ TP ในน้ำแช่ใบไม้ตัวอย่างเพิ่มขึ้นมากกว่า 1 เท่าเมื่อสิ้นสุดการทดลอง นอกจากนี้ Park and Cho (2003) รายงานว่ามีการปลดปล่อยฟอสเฟต (soluble reactive phosphorus; SRP) รวมทั้งไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายน้ำและโพแทสเซียมจากใบของพืชวงศ์หญ้า *(Zizania latifolia)* เมื่อเกิดกระบวนการชะละลาย

Table 1 Average concentration of TP, DIP, DOP, PIP, and POP leaching from *Avicennia alba* leaves. Different superscript letters denote significant differences between leaves age.

Day	Yellow leaves (µg-P/g DW)					Green leaves (µg-P/g DW)				
	TP	DIP	DOP	PIP	POP	TP	DIP	DOP	PIP	POP
1	375.10[a]	317.37	31.07	14.98	11.68	166.99[b]	106.65	35.59	18.11	6.62
5	472.86[b]	352.62	90.89	14.23	15.13	674.02[a]	591.55	42.27	22.34	17.87
10	447.07[b]	369.21	53.92	12.09	11.85	699.53[a]	617.48	32.21	20.12	29.72
21	500.93[b]	395.71	80.45	12.38	12.39	779.41[a]	705.88	31.44	18.89	23.20

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ TP ที่ปลดปล่อยจากการชะละลายใบแสมขาวทั้ง 2 กลุ่ม (Table 1) พบว่ามีความแตกต่างกันระหว่างใบเหลืองและใบเขียว โดยปริมาณ TP ที่ปลดปล่อยจากใบเขียวในวันที่ 5 10 และ 21 ของการทดลองมีค่ามากกว่าใบเหลืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P=0.0038, 0.0004, 0.0000) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่ในใบเหลืองและใบเขียวมีความแตกต่างกัน โดย Lin and Sternberg (2007) ศึกษาพบว่าต้นโกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mangle* L.) จะมีกลไกในการดูดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่สะสมอยู่ภายในใบกลับเข้าสู่ลำต้นก่อนที่ใบจะร่วงหล่น ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในใบเหลืองมีค่าน้อยกว่าใบเขียว และมีผลต่อปริมาณ TP ที่ปลดปล่อยออกมา เช่นเดียวกับ Park and Cho (2003) ที่ระบุว่าชนิดของพืช รวมทั้งขนาด โครงสร้าง คุณสมบัติทางเคมีเริ่มต้นมีผลต่อการชะละลายของธาตุอาหาร

รูปแบบฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อย

เมื่อพิจารณารูปแบบของฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาจากการชะละลายใบแสมขาวทั้ง 2 กลุ่ม พบว่าฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาจากทั้งใบเหลืองและใบเขียวส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารละลายมากกว่าตะกอนแขวนลอย (TDP>TPP) Figure 2 แสดงรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาจากการชะละลายใบแสมขาวทั้ง 2 กลุ่มในวันที่ 1 และ 21 ของการทดลอง โดยพบว่าปริมาณ TDP ที่ปลดปล่อยจากใบเหลืองมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 92.89 – 95.05 และมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 85.19- 94.60 สำหรับใบเขียว และ TDP ที่พบส่วนใหญ่อยู่ในรูป DIP ในขณะที่ปริมาณ TPP ที่พบมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 4.95 – 7.11 สำหรับใบเหลือง และมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.40 – 14.81 สำหรับใบเขียว และมีสัดส่วนระหว่าง PIP และ POP ไม่แตกต่างกัน

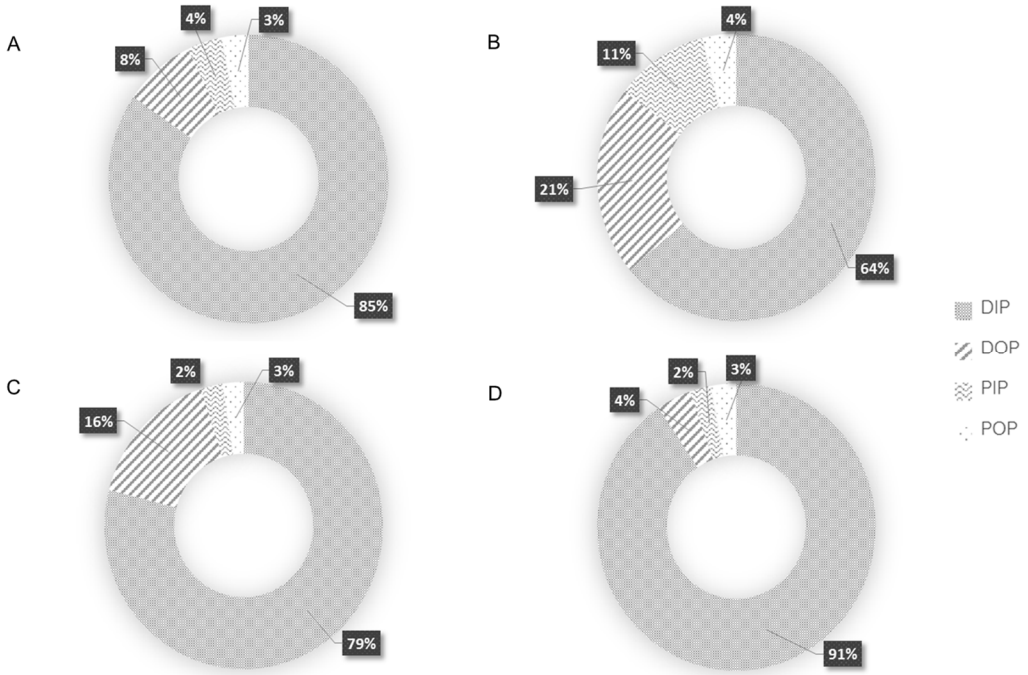


Figure 2 Form of phosphorus release from *Avicennia alba* leaves in different day: (A) yellow leaves (day 1) (B) green leaves (day 1) (C) yellow leaves (day 21) (D) green leaves (day 21)

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณ TDP หรือ TPP ที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างใบเหลืองและใบเขียว พบว่า ปริมาณ TDP ที่ปลดปล่อยออกมาจากใบเหลืองและใบเขียวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (P=0.0001) โดยใบเขียวมีการปลดปล่อย TDP ออกมามากกว่าใบเหลือง ซึ่งแตกต่างจากปริมาณ TPP ที่ปลดปล่อยออกมาจากใบทั้ง 2 กลุ่มที่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P=0.1430) ซึ่งความแตกต่างที่พบเป็นผลมาจากกระบวนการชะละลายที่จะละลายส่วนที่ละลายได้ในใบไม้ออกมาอย่างรวดเร็ว (Gessner *et al*., 1999)

ผลการศึกษาในครั้งนี้นอกจากจะทำให้ทราบถึงปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากการชะละลายใบแสมขาวแล้ว ยังทำให้เข้าใจบทบาทของฟอสฟอรัสในสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีการศึกษาวิจัยพบว่าสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวบางชนิดสามารถเปลี่ยน DOP ให้กลายเป็น DIP และนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยใช้เอนไซม์ Alkaline phosphatase เมื่อแหล่งน้ำมีปริมาณฟอสเฟตต่ำ (Li *et al*., 2015; Ren *et al*., 2017) นอกจากนี้ Correl (1998) ศึกษาพบว่าฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป PIP สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูป DIP ได้ ยิ่งไปกว่านั้นฟอสฟอรัสที่ดูดซับอยู่ที่ผิวด้านนอกของตะกอนแขวนลอยจะหลุดออกและเปลี่ยนไปอยู่ในรูป DIP เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเค็ม (Suzumura *et al*., 2004) หรือภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนน้อย (Lin *et al*., 2016)

ปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้มาหาปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยคำนวณจากอัตราการร่วงหล่นของใบไม้จากการศึกษาของสุพรรษา (2552) พบว่ามีการปลดปล่อย TP จากใบเหลืองผ่านกระบวนการชะละลายเท่ากับ 0.18 กรัม-ฟอสฟอรัส/ตารางเมตร/ปี อย่างไรก็ตามปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมอาจมีค่ามากกว่านี้ เนื่องจากในธรรมชาติมีปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ เช่น คลื่น กระแสน้ำ ซึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมามีมากขึ้น

สรุป

ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่า กระบวนการชะละลายก่อให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากใบแสมขาว ทั้งใบเหลืองและใบเขียว โดยใบเขียวมีการปลดปล่อย TP มากกว่าใบเหลืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการดูดกลับธาตุอาหาร นอกจากนี้ยังพบว่าฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมานี้อยู่ในรูป TDP มากกว่า TPP โดยรูปแบบของ TDP ที่พบส่วนใหญ่อยู่ในรูป DIP และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้มาหาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม พบว่ามีการปลดปล่อย TP จากใบเหลืองผ่านกระบวนการชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 0.18 กรัม-ฟอสฟอรัส/ตารางเมตร/ปี ผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการชะละลายก่อให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสรูปแบบต่าง ๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม และยังช่วยเติมเต็มความเข้าใจเกี่ยวกับการปลดปล่อยธาตุอาหารผ่านกระบวนการชะละลายให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

จิระศักดิ์ ชูความดี และ อภิรักษ์ อนันต์ศิริวัฒน์. 2542. มวลชีวภาพของไม้แสมขาว (*Avicennia alba*) จังหวัดสมุทรสงคราม. **วารสารวิชาการป่าไม้** 1 (1): 25-37.

สุพรรษา เครือจันทร์. 2552. **ปริมาณและคุณภาพของสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในสังคมพืชป่าชายเลนที่มีแสมเป็นพันธุ์ไม้เด่น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

Aspila, K.I., H. Agemian and A.S.Y. Chau. 1976. A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments. **Analyst** 101: 187-197.

Correl D.L. 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving water: a review. **J. Environmental Quality** 27: 261-266.

Davis, S.E.III, C. Corronado-Molina, D.L. Childers and J.W. Jr. Day. 2003. Temporally dependent C, N, and P dynamics associated with the decay of *Rhizophora mangle* L. leaf litter in oligotrophic mangrove wetlands of the Southern Everglades. **Aquatic Botany** 75: 199-215.

Gessner, M.O., E. Chauvet and M. Dobson. 1999. A perspective on leaf litter breakdown in streams. **Oikos** 85: 377-384.

Huang, X.L. and J.Z. Zhang. 2009. Neutral persulfate digestion at sub-boiling temperature in an oven for total dissolved phosphorus determination in natural waters. **Talanta** 78: 1129-1135.

Li, J., Z. Wang, X. Cao, Z. Wang and Z. Zheng. 2015. Effect of orthophosphate and bioavailability of dissolved organic phosphorous compounds to typically harmful cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. **Marine Pollution Bulletin** 92: 52-58.

Lin, P. and L. Guo. 2016. Dynamic changes in the abundance and chemical speciation of dissolved and particulate phosphorus across the river-lake interface in southwest Lake Michigan. **Limnology and Oceanography** 61: 771-789.

Lin, P., J.V. Klump and L. Guo. 2016. Dynamics of dissolved and particulate phosphorus influenced by seasonal hypoxia in Green Bay, Lake Michigan. **Science of the Total Environment** 541: 1070-1082.

Lin, Y. and L.S.L. Sternberg. 2007. Nitrogen and phosphorus dynamics and nutrient resorption of *Rhizophora mangle* leaves in South Florida, USA. **Bulletin of Marine science** 80 (1): 159-169.

Loh, A.N. and J.E. Bauer. 2000. Distribution, partitioning and fluxes of dissolved and particulate organic C, N and P in the eastern North Pacific and Southern oceans. **Deep-Sea Research I** 47: 2287-2316.

Marschner, P. 2012. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants.** Elsevier, United States of America. Murphy, J. and J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. **Analytica Chimica Acta** 27: 31-36.

Park, S. and K. Cho. 2003. Nutrient leaching from leaf litter of emergent macrophyte (*Zizania latifolia*) and the effects of water temperature on the leaching process. **Korean J Biol Sci** 7: 289-294.

Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. **A manual of chemical and biological methods for seawater analysis.** Pergamon Press, Oxford.

Paytan, A. and K. McLaughlin. 2007. The oceanic phosphorus cycle. **Chem. Rev.** 107: 563-576.

Ren, L., P. Wang, C. Wang, J. Chen, J. Hou and J. Qian. 2017. Algal growth and utilization of phosphorus studied by combined mono-culture and co-culture experiments. **Environmental Pollution** 220: 274.285.

Steinke, T.D., A.J. Holland and Y. Singh. 1993. Leaching losses during decomposition of mangrove leaf litter. **S.Afr.J.Bot** 59(1): 21-52.

Suzumura, M., H. Kokubun and N. Arata. 2004. Distribution and characteristics of suspended particle matter in a heavily eutrophic estuary, Tokyo Bay, Japan. **Marine Pollution Bulletin** 49: 496-503.

World Wide Fund for Nature. n.d. **Mangrove Importance.** Available Source: http://wwf.panda.org/about_our_earth/blue_planet/coasts/mangroves/mangrove_importance/, March 27, 2017.

ความสัมพันธ์ของหอยกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน บริเวณป่าชายเลนปากแม่น้ำตำบลคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม

Molluscs in Relation to Soil Organic Matter Content in Mangrove Estuary at Klong Kone and Laem Yai Sub-district, Samut Songkhram Province

สรนันท์ วิธิรวาท[1] และ ศิรประภา เปรมเจริญ[1*]

Soranan Witirawat[1] and Siraprapha Premcharoen[1*]

บทคัดย่อ

การใช้ประโยชน์พื้นที่ป่าชายเลนของมนุษย์ส่งผลให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินเปลี่ยนแปลงไป และหอยเป็นสัตว์หน้าดินที่กินอินทรียวัตถุในดินเป็นอาหารและเป็นดัชนีชี้วัดทางชีวภาพ การศึกษาครั้งนี้ศึกษาชนิด ความหนาแน่น และการกระจายของหอยที่สัมพันธ์กับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน บริเวณป่าชายเลน ตำบลคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม ในช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมกราคม 2560 พบหอยทั้งหมด 1,474 ตัว ประกอบด้วยหอยฝาเดียว 23 ชนิด และหอยสองฝา 7 ชนิด หอยชนิดเด่นที่พบ ได้แก่ *Littoraria articulata* (ร้อยละ 34.19) รองลงมาได้แก่ *Assiminea brevicula*, *Littoraria melanostoma* และ *Cassidula aurisfelis* พบร้อยละ 30.12, 8.48 และ 5.77 ตามลำดับ และพบความหนาแน่นสูงสุดในเดือนกรกฎาคม 2559 (ต้นฤดูฝน) บริเวณบ่อกุ้งร้างตำบลคลองโคน (KK2) ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p>0.05$) ของแต่ละฤดูกาลและสถานีเก็บตัวอย่าง สถานีเก็บตัวอย่างพบปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูง เฉลี่ยร้อยละ 3.96±0.93 และพบว่าความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของหอยชนิดเด่นกับปริมาณอินทรียวัตถุในดินพบมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

ABSTRACT

Organic matter content in mangrove is being changed by human activities. Molluscs are macrobenthos that feed on organic matter and act as bio-indicator for contamination. Species composition, abundance and distribution of molluscs in relation to soil organic matter content in mangrove estuary at Klong Kone and Laem Yai Sub-district, Samut Songkhram Province was conducted seasonally between April 2016 and January 2017 in 6 areas (4 shrimp farms and 2 mangrove forests). Totally 1,474 individuals, representing 23 gastropods and 7 bivalves. Dominant species were *Littoraria articulata* (34.19%) followed by *Assiminea brevicula, Littoraria melanostoma* and *Cassidula aurisfelis*, with of the percentages of 30.12, 8.48 and 5.77 respectively. The highest density of mollusc recorded in July 2016 (early rainy season) at abandoned shrimp farm at Klong Kone Sub-district (KK2). There was no significant difference in species composition and abundance of molluscs at different stations and seasons ($p>0.05$). The mean overall of organic matter content was 3.96±0.93%. There was a statistical significance of correlation between the density of dominant species and organic matter content ($p<0.05$).

Key Words: molluscs, organic matter content, mangrove

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

[1]สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

[1]Environmental Science and Technology Program, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140

คำนำ

ป่าชายเลนเป็นระบบนิเวศที่เป็นเขตเชื่อมต่อระหว่างระบบนิเวศบนบกและระบบนิเวศทางทะเล มีความสำคัญในด้านการเป็นแหล่งอาหาร แหล่งที่อยู่อาศัย แหล่งหลบภัย และแหล่งอนุบาลของสัตว์น้ำ ดังนั้น ป่าชายเลนจึงนับได้ว่าเป็นแหล่งที่ควรแก่การอนุรักษ์ไว้อย่างยิ่ง โดยป่าชายเลนเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตหลายกลุ่มทั้งสัตว์มีกระดูกสันหลัง เช่น ลิง ปลา สัตว์เลื้อยคลานต่าง ๆ รวมทั้งสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง เช่น สัตว์หน้าดินจำพวกกุ้ง หอย ปู เป็นต้น (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2556) สัตว์หน้าดินมีความสำคัญต่อระบบนิเวศป่าชายเลนโดยเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างผู้ผลิตและผู้บริโภคลำดับถัดไปในห่วงโซ่อาหาร สัตว์หน้าดินที่มีความโดดเด่นในป่าชายเลน ได้แก่ กลุ่มมอลลัสก์ เนื่องมาจากความหลากหลายของสภาพถิ่นอาศัยส่งผลให้มีการกระจายตัวตามนิสัยการดำรงชีวิต และพบความจำเพาะในการปรับตัวให้เข้ากับพื้นที่ได้ เช่น การหลบภัยและการพรางตัว รวมถึงการตอบสนองต่ออุณหภูมิ น้ำขึ้นน้ำลง น้ำกร่อย และการปรับตัวต่อตะกอนดิน (ชีวารัตน์, 2554) ตะกอนดินในป่าชายเลนมักประกอบไปด้วยสารอินทรีย์และธาตุอาหารต่าง ๆ มักพบสะสมอยู่ในดิน ตะกอนเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นอาหารของสัตว์น้ำขนาดเล็ก เช่น สัตว์หน้าดิน ปริมาณสารอินทรีย์ในดินมักเปลี่ยนแปลงไปตามกิจกรรมจากธรรมชาติและกิจกรรมจากสิ่งมีชีวิต (กนกเรขา, 2554) ตำบลคลองโคนและแหลมใหญ่เป็นตำบลที่พบป่าชายเลนมากที่สุดในจังหวัดสมุทรสงคราม พบว่าการใช้ประโยชน์พื้นที่ของป่าชายเลนในจังหวัดสมุทรสงคราม ทั้งการเป็นแหล่งชุมชน แหล่งเพาะพันธุ์สัตว์น้ำ รวมถึงการท่องเที่ยว ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศป่าชายเลนในพื้นที่ การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของหอยกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดแนวทางอนุรักษ์ระบบนิเวศป่าชายเลนต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ทำการศึกษา

พื้นที่ทำการศึกษาอยู่บริเวณป่าชายเลน ตำบลคลองโคนและตำบลแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม ช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมกราคม 2560 เก็บตัวอย่าง 4 ครั้ง ได้แก่ เมษายน 2559 (ฤดูแล้ง) กรกฎาคม 2559 (ต้นฤดูฝน) ตุลาคม 2559 (ปลายฤดูฝน) และมกราคม 2560 (ฤดูหนาว) โดยมีสถานีเก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 6 สถานี แต่ละสถานีจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนี้ สถานีเก็บตัวอย่างตำบลคลองโคน ได้แก่ บริเวณแหล่งชุมชน (KK1) บริเวณบ่อกุ้งร้าง(KK2) และป่าธรรมชาติ (KK3) ตำบลแหลมใหญ่ ได้แก่ บริเวณบ่อกุ้งติดอ่าว (LY1) บริเวณบ่อกุ้งไม่ติดอ่าว (LY2) และป่าธรรมชาติ (LY3) วัดพิกัดทางภูมิศาสตร์โดย GPS (Figure 1)

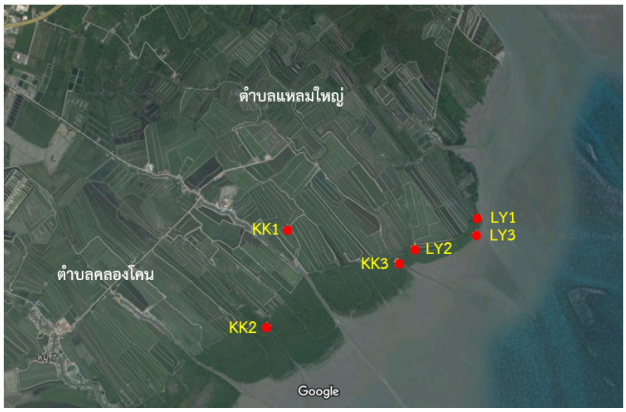


Figure 1 Location of sampling sites.

การเก็บรวบรวมตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างหอยในจุดเก็บตัวอย่างตาม Figure 1 โดยใช้ตารางสี่เหลี่ยมนับสัตว์ (quadrat) วางแบบสุ่มในบริเวณจุดเก็บตัวอย่าง 3 ครั้ง ทำการเก็บตัวอย่างหอยที่อยู่ในตารางสี่เหลี่ยมนับสัตว์และบริเวณต้นไม้โดยรอบใส่ลงในกระสอบ จากนั้นใช้ท่อเก็บตัวอย่าง (core) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร กดลงในดินที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร จำนวน 3 ครั้ง และที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร จำนวน 3 ครั้ง นำตัวอย่างที่ได้ใส่ในอีกกระสอบ จากนั้นนำตัวอย่างกลับมาร่อนน้ำผ่านตะแกง และนำตัวอย่างใส่ในกระปุก รักษาตัวอย่างด้วยฟอร์มาลิน 5 เปอร์เซ็นต์ และทำการเก็บตัวอย่างดินโดยการใช้พลั่วขุดดินประมาณ 1 กิโลกรัม ใส่ลงในถุงซิป เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

การจำแนกชนิดของหอยและการวิเคราะห์

จำแนกชนิดของหอยในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เอกสารของ Habe (1964); Kira (1965) เพื่อจำแนกชนิดของหอย จากนั้นทำการนับจำนวน และบันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม Microsoft Exel วิเคราะห์หาความแตกต่างทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบในแต่ละจุดเก็บตัวอย่าง โดย Analysis of Variance (ANOVA) วิเคราะห์หาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation analysis, R) (Hinkle *et al*., 1998) โดยวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของหอยชนิดเด่นกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน และหาปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ด้วยวิธี Walkley and Black method (Walkley and Black, 1934)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ชนิด การกระจายและความหนาแน่นของหอย

จากตัวอย่างหอยที่รวบรวมได้ในป่าชายเลน ตำบลคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม พบทั้งหมด 1,474 ตัว ประกอบด้วยหอยฝาเดียว 23 ชนิด และหอยสองฝา 7 ชนิด พบการกระจายของหอยมากที่สุดในเดือนกรกฎาคม 2559 (ต้นฤดูฝน) บริเวณบ่อกุ้งร้างตำบลคลองโคน (KK2) พบหอยทั้งหมด 11 ชนิด และพบการกระจายน้อยที่สุดในเดือนมกราคม 2560 (ฤดูหนาว) บริเวณแหล่งชุมชน ตำบลคลองโคน (KK1) พบเพียง 2 ชนิด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจำนวนชนิดของหอยที่พบในแต่ละฤดูกาลและแต่ละสถานีเก็บตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p>0.05$) พบความหนาแน่นของหอยในแต่ละฤดูกาลอยู่ที่ 62.33 ถึง 204.33 ตัว/ตารางเมตร พบความหนาแน่นสูงสุดในเดือนตุลาคม 2559 (ปลายฤดูฝน) และพบต่ำสุดในเดือนเมษายน 2559 (ฤดูแล้ง) สอดคล้องกับงานของสุเมตต์ (2548) กล่าวว่าฤดูฝนพบความหนาแน่นของสัตว์หน้าดินสูงกว่าฤดูแล้ง และในแต่ละสถานีเก็บตัวอย่างอยู่ที่ 25.67 ถึง 133.67 ตัว/ตารางเมตร พบความหนาแน่นสูงสุดบริเวณน้ำทิ้งบ่อกุ้งร้าง ตำบลคลองโคน (KK2) และพบต่ำสุดบริเวณแหล่งชุมชน ตำบลคลองโคน (KK1) เนื่องจากบริเวณบ่อกุ้งร้างมีการฟื้นฟูของระบบนิเวศใกล้เคียงกับป่าธรรมชาติและมีปริมาณธาตุอาหารที่สมบูรณ์ทำให้พบความหนาแน่นสูงและบริเวณแหล่งชุมชมพบว่าสภาพพื้นที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของหอยทำให้พบความหนาแน่นของหอยน้อย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความหนาแน่นของหอยที่พบในแต่ละฤดูกาลและแต่ละสถานีเก็บตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p>0.05$)

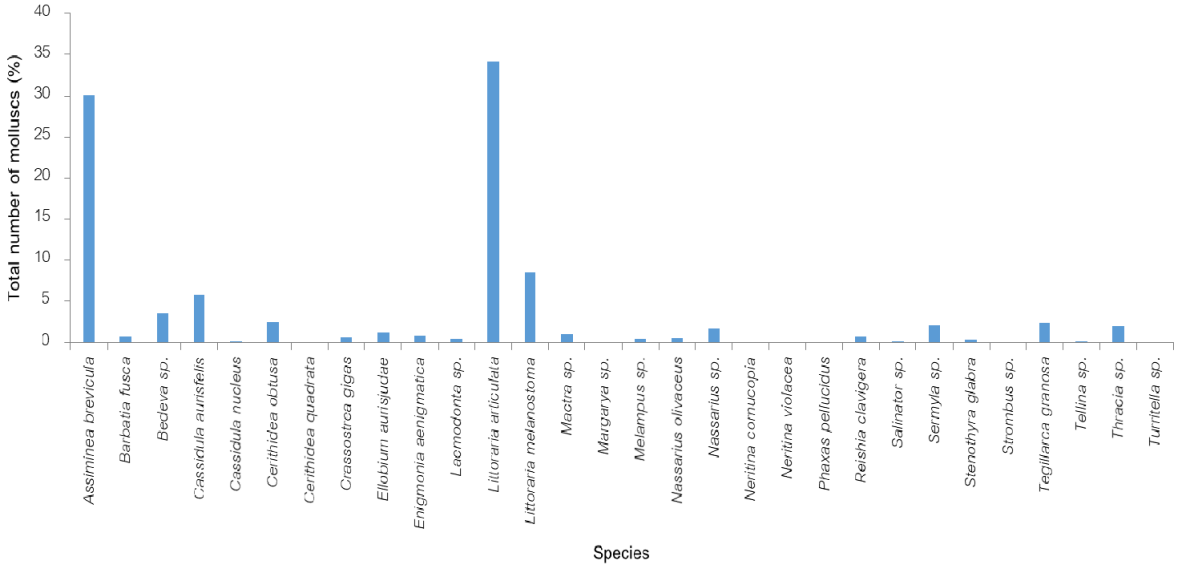


Figure 2 Percentages of molluscs in mangrove estuary at Klong Kone and Laem Yai Sub-district, Samut Songkhram Province.

พบหอยชนิดเด่น ได้แก่ *Littoraria articulata* พบร้อยละ 34.19 รองลงมาได้แก่ *Assiminea brevicula, Littoraria melanostoma* และ *Cassidula aurisfelis* พบร้อยละ 30.12, 8.48 และ 5.77 ตามลำดับ (Figure 2) จากการศึกษาพบหอยฝาเดียวชนิด *Littoraria articulata* สูงสุด เนื่องจากสามารถพบหอยฝาเดียวชนิดนี้ได้บริเวณรากไม้ของต้นไม้ป่าชายเลนและพบในทุกสถานีเก็บตัวอย่าง หอยฝาเดียวชนิดเด่นทั้งหมดที่พบสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kantharajan *et al.* (2017) ทำการศึกษาหอยในระบบนิเวศป่าชายเลนของเมืองมุมไบ ประเทศอินเดีย หอยที่พบมาก เช่น *Cassidula* sp., *Melampus* sp. และ *Littoraria* sp. และจากการวิจัยของ Siraprapha *et al.* (2016) ศึกษาประชาคมของหอย บริเวณป่าชายเลนปากแม่น้ำบางตะบูน จังหวัดเพชรบุรี พบหอยชนิดเด่น ได้แก่ *Assiminea brevicula* และ *Tegillaca granosa* สุวิจักษณ์ (2554) ทำการศึกษาความหลากหลายของหอยในพื้นที่ป่าชายเลนบางปู จังหวัดสมุทรปราการ พบหอยชนิดเด่น ได้แก่ *Assiminea* sp. และจากการศึกษาหอยชนิดเด่นที่พบทั้งหมดเป็นหอยฝาเดียวซึ่งมีความสมารถในการเคลื่อนไปยังสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมได้ (ชีวารัตน์, 2554) โดยเดือนกรกฎาคม 2559 (ต้นฤดูฝน) และเดือนตุลาคม 2559 (ปลายฤดูฝน) เป็นช่วงเวลาเก็บตัวอย่างที่มีระดับน้ำทะเลสูง ทำให้สามารถเก็บหอยฝาเดียวบนต้นไม้ได้มากกว่าหอยสองฝาที่อาศัยอยู่บนผิวดิน

ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่เก็บมาในแต่ละสถานีเก็บตัวอย่าง ช่วงเดือนเมษายน 2559 ถึงเดือนมกราคม 2560 พบปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

Table 1 Organic matter (%) in different stations between April 2016 and January 2017.

	KK1	KK2	KK3	LY1	LY2	LY3	average±sd
April 2016	3.98	4.44	4.12	3.55	3.92	1.35	3.56±1.02
July 2016	4.05	4.13	4.36	3.72	4.33	2.36	3.83±0.69
October 2016	4.04	4.38	4.37	2.42	5.15	3.44	3.97±0.86
January 2017	4.6	4.62	5.23	2.95	5.56	3.89	4.48±0.86
average±sd	4.17±0.25	4.39±0.18	4.52±0.42	3.16±0.51	4.74±0.65	2.76±0.99	3.96±0.93

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่เก็บมาในแต่ละสถานีเก็บตัวอย่าง (Table 1) พบว่าปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่พบมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 3.96±0.93 ในแต่ละฤดูกาลพบปริมาณอินทรียวัตถุในดินอยู่ที่ร้อยละ 3.56±1.02 ถึง 4.48±0.86 และในแต่ละสถานีเก็บตัวอย่างพบปริมาณอินทรียวัตถุในดินอยู่ที่ร้อยละ 2.76±0.99 ถึง 4.74±0.65 จากข้อมูลข้างต้นพบว่าปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่พบมีปริมาณค่อนข้างสูงถึงสูงมาก สอดคล้องกับงานวิจัยของศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งอ่าวไทย ตอนบน (2548) กล่าวว่าปริมาณสารอินทรีย์มีค่าสูงในบริเวณที่เป็นแหล่งเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและบริเวณที่มีกิจกรรมของมนุษย์สูง โดยบริเวณปากแม่น้ำจะพบปริมาณสารอินทรีย์สูงตลอดทั้งปี เนื่องจากเป็นจุดรองรับการถ่ายเทมวลสารที่เกิดจากการทำกิจกรรมของมนุษย์และธรรมชาติ ฤดูกาลที่พบปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงสุด ได้แก่ เดือนมกราคม 2560 (ฤดูหนาว) สอดคล้องงานวิจัยของกนกเรขา (2554) พบปริมาณสารอินทรีย์และธาตุอาหารสูงในฤดูหนาว เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการร่วงหล่นของซากพืชในป่าชายเลนสูง ส่งผลให้สารอินทรีย์สะสมในดินตะกอนสูงและสถานีเก็บตัวอย่างที่พบปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงสุด ได้แก่ บริเวณบ่อกุ้ง ไม่ติดอ่าว ตำบลแหลมใหญ่ (LY2) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่พบในแต่ละฤดูกาลและแต่ละสถานีเก็บตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p>0.05$)

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของหอยชนิดเด่นกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

เมื่อพิจารณาชนิดของหอย พบหอยชนิดเด่น ได้แก่ *Littoraria articulata* รองลงมาคือ *Assiminea brevicula, Littoraria melanostoma* และ *Cassidula aurisfelis* จากการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation analysis) ของสัตว์หน้าดินขนาดใหญ่ชนิดเด่นกับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม

Table 2 Correlation analysis (R) between the density of dominant species and organic matter.

species	*Littoraria articulata*	*Assiminea brevicula*	*Littoraria melanostoma*	*Cassidula aurisfelis*
Organic matter	0.954*	-0.011*	0.949*	0.452*

Note: $p<0.05$

จากการวิเคราะห์หาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของหอยชนิดเด่นกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (Table 2) พบว่าหอยชนิด *Littoraria articulata*, *Littoraria melanostoma* และ *Cassidula aurisfelis* มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกันปริมาณอินทรียวัตถุในดินกล่าวได้ว่า เมื่อปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้นจะ

พบความหนาแน่นของสัตว์หน้าดินขนาดใหญ่ชนิดดังกล่าวเพิ่มขึ้น พบหอยสกุล *Littoraria* มีความสัมพันธ์อย่างสูงกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Marcel and Rafaela (2006) ศึกษาลักษณะทางกายภาพของ *Littoraria angulifera* พบว่าหอยชนิดนี้จะกระจายตัวอยู่ใกล้กับป่าชายเลนที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง และ Firth (1977) พบว่าหอยชนิด *Cassidula aurisfelis* สามารถปรับตัวได้ดีในบริเวณที่มีการแข่งขันกันทางด้านแหล่งที่อยู่อาศัยและด้านอาหารได้แก่ สารอินทรีย์ สำหรับหอยชนิด *Assiminea brevicula* พบว่ามีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของหอยชนิดเด่นกับปริมาณอินทรียวัตถุในดินพบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของทองทิพย์ และคณะ (2559) พบว่าปริมาณสารอาหารที่สะสมในดินแต่ละฤดูกาลและลักษณะเนื้อดินส่งผลต่อการเจริญเติบโตของหอยแครง

สรุป

การศึกษาหอยบริเวณป่าชายเลน ตำบลคลองโคนและแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม พบหอยทั้งหมด 30 ชนิด (หอยฝาเดียว 23 ชนิด และหอยสองฝา 7 ชนิด) หอยชนิดเด่นที่พบ ได้แก่ *Littoraria articulata* และพบความหนาแน่นของหอยทั้งหมดสูงสุดในเดือนกรกฎาคม 2559 (ต้นฤดูฝน) บริเวณบ่อกุ้งร้างตำบลคลองโคน (KK2) ในแต่ละฤดูกาลและสถานีเก็บตัวอย่างไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p>0.05$) ปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่พบมีปริมาณค่อนข้างสูงถึงสูงมากมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 3.96±0.93 และพบความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของหอยชนิดเด่นกับปริมาณอินทรียวัตถุในดินพบมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$) หอยชนิด *Littoraria articulata, Littoraria melanostoma* และ *Cassidula aurisfelis* มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกันปริมาณอินทรียวัตถุในดิน แต่หอยชนิด *Assiminea brevicula* พบว่ามีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน การศึกษาครั้งนี้ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของหอยและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนการจัดการในแง่ของการอนุรักษ์และการจัดการทรัพยากรชายฝั่งและสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย ประเภททุนบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2560 และขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะศิลปะศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำหรับสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กนกเรขา สังข์จันทร์. 2554. การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์และธาตุอาหารในดินตะกอน ป่าชายเลนที่มีแสมขาวเป็นพันธุ์ไม้เด่น. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี** 19 (2): 28-39.

กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2556. **ป่าชายเลน**. ระบบฐานข้อมูลกลางและมาตรฐานข้อมูล ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. แหล่งที่มา: http://marinegiscenter.dmcr.go.th, 19 กันยายน 2560.

ชีวารัตน์ พรินทรากูล. 2554. มอลลัสก์ในระบบนิเวศป่าชายเลนบริเวณอ่าวไทย: ความหลากหลาย และการปรับตัว. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา** 16 (2): 114-124.

ทองทิพย์ วงษ์ศิลป์, จินตนา สและน้อย, กังสดาลย์ บุญปราบ, Takashi Yoshikawa, Yuki Okamoto และ Satoshi Ishikawa. 2559. การสะสมโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตในดินตะกอนบริเวณพื้นที่เพาะเลี้ยงหอยแครง (Anadara granosa) ในอ่าวบ้านดอน จังหวัดสุราษฎร์ธานี. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี** 24 (2): 310-319.

ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งอ่าวไทยตอนบน. 2548. **ระบบนิเวศน้ำกร่อยแม่น้ำบางปะกง**. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง.

สุเมตต์ ปุจฉาการ. 2548. สัตว์ทะเลหน้าดินบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก. มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.

สุวิจักษณ์ โสตถิโยธิน. 2554. ความหลากหลายชนิดพันธุ์ของหอยน้ำกร่อยในพื้นที่ป่าชายเลนบางปู จังหวัดสมุทรปราการ. **วารสารมหาวิทยาลัยศิลปากร** 4 (1): 912-916.

Firth, D. W. 1977. A preliminary list of macrofauna from a mangrove forest and adjacent biotopes at Koh Surin, western peninsular Thailand. Phuket Marine Biological Centre. **Research Bulletin** 17: 1-14.

Habe, T. 1964. Fauna Japonica; Scaphopoda (Mollusca). Biogeographical Society of Japan, Tokyo.

Hinkle, D.E, W. William, and G. J. Stephen. 1998. **Applied Statistics for the Behavior Sciences**. Houghton Mifflin. New York.

Kantharajan, G., K. Pandey, P. Krishnan, V. Deepak Samuel, V.S. Bharti and R. Purvaja. 2017. Molluscan diversity in the mangrove ecosystem of Mumbai, west coast of India. **Regional Studies in Marine Science** 14 (2017): 102-111.

Kira, T. 1995. Shell of the Western Pacific in color. Hoikusha, Osaka.

Marcel, O. T. and C. M. Rafaela. 2006. Shell morphological variation of Littoraria angulifera among and within mangroves in NE Brazil. **Hydrobiologia** 559: 193-202.

Siraprapha, P., W. Soranan and T. Pobporn. 2016. Molluscan Fauna in Bang Taboon Mangrove Estuary, Inner Gulf of Thailand: Implications for conservation and sustainable use of coastal resources. **MATEC Web of Conferences** 60: 1-5.

Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci**. 37: 29-37.

การคัดแยกและระบุสายพันธุ์แบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสจากน้ำเสียการผลิตปลาส้ม

Screening and Identification of Lipase Producing Bacteria From Fermentation Fish Production Wastewater

สิรินาถ ปลอดสุวรรณ[1] สุชัญญา ทองเครือ[1*] และ ชญานันท์ จิตมณี[1]

Sirinart Plodsuwan[1], Suchanya Thongkrua[1*] and Chayanan Jitmanee[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกแบคทีเรียที่สามารผลิตเอนไซม์ไลเปส จากน้ำเสียการผลิตปลาส้ม ในพื้นที่จังหวัดพะเยา โดยคัดแยกจากแบคทีเรียที่สามารถเปลี่ยนสี bromocresol purple ในจานอาหาร screening medium จากสีม่วงเป็นสีเหลือง บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบแบคทีเรียที่มีลักษณะแตกต่างกันทั้งหมด 29 ไอโซเลท สามารถย่อยสลายไตรบิวไทรินบนจานอาหาร TA แล้วเกิดโซนใสรอบโคโลนี (Clear zone) ทั้งหมด 6 ไอโซเลท ได้แก่ WS1, WA6, WA9, WA11, WL12 และ WL13 การวิเคราะห์ค่าดัชนีเอนไซม์ไลเปสและค่ากิจกรรมเอนไซม์ไลเปส พบว่า WL12, WA6 และ WL13 มีค่าค่าดัชนีเอนไซม์ไลเปสสูงสุดเท่ากับ 2.86, 2.80,2.64 และมีค่ากิจกรรมเอนไซม์ไลเปสสูงสุดเท่ากับ 151.45, 150.90, 141.89 หน่วยต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และนำไประบุสายพันธุ์ของแบคทีเรียพบว่าไอโซเลท WS1, WA6, WA9, WA11, WL12 และ WL13 คือ *Staphylococcus cohnii*, *Bacillus* sp., *Burkholderia multivorans*, Enterobacteriaceae, *Staphylococcus warneri* และ *Bacillus* sp. ตามลำดับ

ABSTRACT

The objective of this research was to screen lipase producing bacteria from fermented fish production wastewater in Phayao province. Twenty-nine isolates, that yellow around colonies on Screening medium agar were selected, and incubated at 30°C for 48 hours. WS1, WA6, WA9, WA11, WL12 and WL13 capable of degrading tributyrin on tributyrin agar and showing clear zone around colony. Lipase enzyme index and lipase activity of isolates bacteria were investigated. WL12, WA6 and WL13 has highest lipase enzyme index as 2.86, 2.80, 2.64 and has highest lipase activity as 151.45, 150.90, 141.89 Unit/mL respectively. 16SrDNA sequencing analysis revealed that WS1, WA6, WA9, WA11, WL12 and WL13 were *Staphylococcus cohnii*, *Bacillus* sp., *Burkholderia multivorans*, Enterobacteriaceae, *Staphylococcus warneri, Bacillus* sp. respectively.

Key Words: bacteria, lipase enzyme, fermented fish production wastewater

*Corresponding author; e-mail address: suchanya_9@yahoo.com

[1]สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา พะเยา 56000

[1]Major of Environmental Science, School of Energy and Environment, University of Phayao, Phayao

คำนำ

อุตสาหกรรมอาหารจัดเป็นแหล่งสร้างมลพิษทางน้ำแหล่งใหญ่แห่งหนึ่ง น้ำเสียส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการแปรรูปอาหาร ล้างวัตถุดิบ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำให้น้ำเสียดังกล่าวมีปริมาณสารอินทรีย์สูง (อัจฉรา, 2542) น้ำมันและไขมันเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตอาหารและแปรรูปอาหาร ซึ่งน้ำมันและไขมันที่เหลือจากกระบวนการผลิตอาหารหากขาดการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมที่ดี หรือมีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำตามมามากมาย เช่น ทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลง เนื่องจากน้ำมันและไขมันจะไปคลุมผิวน้ำทำให้ออกซิเจนในบรรยากาศไม่สามารถละลายในน้ำได้ อีกทั้งยังบดบังแสงอาทิตย์ไม่ให้ส่องผ่านลงไปในน้ำ ทำให้การสังเคราะห์แสงของพืชน้ำลดลง น้ำมันและไขมันเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนเกิดจากกลีเซอรอลรวมตัวกับกรดไขมันได้เป็นไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นน้ำมันและไขมันชนิดหนึ่งในน้ำเสีย (พจน์ และคณะ, 2555) อุตสาหกรรมการผลิตปลาส้มเป็นอุตสาหกรรมย่อยในกลุ่มอุตสาหกรรมอาหาร เป็นภูมิปัญญาพื้นบ้านล้านนาในการถนอมอาหารที่ขึ้นชื่อของจังหวัดพะเยา แต่ในขณะเดียวกันการผลิตปลาส้มในแต่ละวันจะมีการปล่อยน้ำเสียจากกระบวนการผลิตในปริมาณมากซึ่งจากการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์จากน้ำเสียของโรงงานปลาส้มพบว่ามีค่าน้ำมันและไขมันเท่ากับ 160.40 กรัมต่อลิตร (สุวัฒน์ศักดิ์, 2551) ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ.2560 คือ ปริมาณน้ำมันและไขมันต้องไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร กรมควบคุมมลพิษ (2560) การกำจัดน้ำมันและไขมันในน้ำเสียสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยวิธีการทางชีวภาพเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายน้ำมันและไขมัน โดยการไฮโดรไลซีสบริเวณพันธะเอสเทอร์ของน้ำมันและไขมันโดยใช้เอนไซม์ไลเปส จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น กลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ (พักตร์พิมล, 2552) จากงานวิจัยของ Bala *et al*.,(2014) พบว่า *Bacillus sereus*103PB ที่คัดแยกได้จากบริเวณโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มสามารถย่อยสลายน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มได้ 85.14 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 5 วัน และ Lauprasert *et al*.,(2017) ใช้เชื้อ *Pseudomonas aeruginosa, Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus epidermidis* ในการบำบัดชั้นไขมันของบ่อดักไขมันโรงอาหาร พบว่าสามารถลดชั้นไขมันได้ 61.22, 57.14 และ 53.06 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 5 วัน ตามลำดับ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้คัดแยกและระบุสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ไลเปสจากน้ำเสียการผลิตปลาส้มในจังหวัดพะเยา เพื่อนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันและไขมัน และเป็นการนำทรัพยากรทางชีวภาพมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บตัวอย่างน้ำเสียและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียการผลิตปลาส้ม ในจังหวัดพะเยา

เก็บตัวอย่างน้ำเสียการผลิตปลาส้มในจังหวัดพะเยา โดยทำการเก็บแบบจ้วง (Grap sampling) จากบ่อพักน้ำเสียเพื่อนำมาคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสและจากน้ำเสียที่ไหลล้นออกจากท่อบ่อพักน้ำเสียเพื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

การคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไลเปส

คัดแยกแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ไลเปส (Lipase) จากน้ำเสียของทุกสถานที่การผลิตปลาส้ม จากบ้านสันเวียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ทั้งหมด 4 จุด โดยปิเปตน้ำเสีย ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีอาหาร Screening Medium (SM) ประกอบด้วย Fresh fish fat 10.0 g, KH_2PO_4 1.0 g, $(NH_4)_2SO_4$ 0.5 g, $MgSO_4.7H_2O$ 5 g, Bromocresol purple (Indicator) 0.064 g ผสมในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ปริมาตร 90 มิลลิลิตร นำไปเพาะเลี้ยงในตู้บ่มเพาะเชื้อแบบ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง คัดเลือกเฉพาะขวดที่มีการเปลี่ยนสีอินดิเคเตอร์ในอาหารเหลวจากสีม่วงเป็นสีเหลืองมาทำการเจือจางที่ความเข้มข้น 10^{-1}-10^{-6} ในน้ำกลั่น จากนั้นปิเปตน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ที่ความเจือจาง 10^{-4}-10^{-6} ไปทำการ Spread plate บนจานอาหารแข็ง SM บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง คัดเลือกเฉพาะโคโลนีที่มีการเปลี่ยนสีอินดิเคเตอร์ บนจานอาหารแข็งจากสีม่วงเป็นสีเหลืองมาทำการ Streak plate บนจานอาหารแข็ง Nutrient Agar (NA) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้ได้โคโลนีเดี่ยว และนำไปศึกษาการเกิดบริเวณโซนใส

การคัดเลือกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสโดยดูบริเวณโซนใส (Clear zone)

นำแบคทีเรียที่คัดแยกได้ทั้งหมดมาเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว Nutrient Broth (NB) เพื่อเพิ่มปริมาณเชื้อแบคทีเรีย จากนั้นนำไปปรับความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ให้มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.08 ถึง 0.1 จะทำให้มีความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นเท่ากับ $1.5x10^8$ CFU/ml แล้วปิเปตสารละลายเชื้อแบคทีเรียปริมาตร 100 ไมโครลิตร หยดลงบนอาหาร Tributyrin Agar (TA) ประกอบด้วย Tributyrin 10 ml, Peptone 5 g, Yeast extract 5 g, Agar 15 g ผสมในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ทั้งหมด 4 จุด บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง บันทึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนใสและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนี (ณภัทร และคณะ, 2558) นำไปคำนวณหาค่าดัชนีเอมไซม์ไลเปส (สุรอรรถ, 2543) ดังสมการที่ 1

$$\text{ดัชนีเอนไซม์ไลเปส} = \frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางโซนใส (มิลลิเมตร)}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี (มิลลิเมตร)}} \quad (1)$$

การวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ไลเปส (Lipase Activity)

1. การเตรียม Crude enzyme

นำแบคทีเรียที่เกิดบริเวณโซนใส (Clear zone) ทุกไอโซเลทมาวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ไลเปส โดยเลี้ยงแบคทีเรียในอาหาร NB เพื่อเพิ่มปริมาณ จากนั้นปรับความเข้มข้นของแบคทีเรียโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ให้มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.08 ถึง 0.1 จะทำให้มีความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นเท่ากับ $1.5x10^8$ CFU/ml และถ่ายเชื้อปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีอาหาร SM ที่ปราศจาก Bromocresol purple ปริมาตร 9 มิลลิลิตร แล้วนำไปเพาะเลี้ยงในตู้บ่มเพาะเชื้อแบบเขย่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 19,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แยกเก็บส่วนใส (Supernatant) ที่ได้คือสารละลายเอนไซม์ไลเปส เพื่อนำไปวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ไลเปสต่อไป (สุวัฒน์ศักดิ์, 2551)

2. วิธีทดสอบกิจกรรมเอนไซม์ไลเปส (Lipase activity)

เตรียมสารตั้งต้น ประกอบด้วย โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ร้อยละ 2 ปริมาตร 45 มิลลิลิตร น้ำกลั่น ปริมาตร 45 มิลลิลิตร และน้ำมันมะกอกปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิเปตสารตั้งต้นปริมาตร 2 มิลลิลิตร เติมสารละลายเอนไซม์ไลเปสปริมาตร 4 มิลลิลิตร และ 0.2 M phosphate ที่ pH 7 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปบ่มในตู้บ่มเพาะเชื้อแบบเขย่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และหลังจากนั้นเริ่มเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาตามกำหนดทำการยับยั้งปฏิกิริยาโดยเติม acetone:ethanol ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วทำการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N NaOH โดยใช้ฟีนอลทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ จนสารละลายเป็นสีชมพูอ่อนจึงหยุดการไทเทรต (สำหรับการทดสอบ Blank ทำเหมือนการทดสอบเอนไซม์ต่างกันที่การเติมสารยับยั้งก่อนการเติมสารละลายเอนไซม์) และคำนวณหากิจกรรมเอนไซม์ไลเปส (อัจฉรา, 2542) ดังสมการที่ 2

$$\text{กิจกรรมเอนไซม์ไลเปส (หน่วยต่อมิลลิลิตร)} = \frac{(M-M_0)}{\text{ความชัน } (1.1\times10^{-3})} \quad (2)$$

โดย M = ปริมาณ NaOH ที่ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยา x โมลาร์ของ NaOH

M_0 = ปริมาณ NaOH ที่ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยากับ Blank x โมลาร์ของ NaOH

ความชัน = ความชันของกราฟมาตรฐานของกรดโอเลอิก

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและระบุสายพันธุ์ของแบคทีเรีย

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อแบคทีเรียดังต่อไปนี้ได้แก่ การติดสีแกรม รูปร่างและการจัดเรียงตัว ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ และระบุสายพันธุ์ของแบคทีเรียโดยเทคนิค Single 16s ribosomal DNA (rDNA) (นภัสพร, 2551) โดยใช้ Genomic DNA mini kit ของบริษัท Gerneaid biotech Ltd., Taiwan

ผลและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียการผลิตปลาส้มในจังหวัดพะเยา

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ จากน้ำเสียที่ไหลล้นออกจากท่อบ่อพักน้ำเสียและไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมด้านนอกของสถานที่การผลิตปลาส้ม บ้านสันเวียงใหม่ จังหวัดพะเยา พบว่าคุณภาพน้ำส่วนใหญ่มีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ.2560 (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) (Table 1)

ผลของการคัดแยกแบคทีเรียจากน้ำเสียจากการผลิตปลาส้ม

จากการคัดแยกแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ไลเปสจากน้ำเสียการผลิตปลาส้มทั้งหมด 4 จุด พบแบคทีเรียที่สามารถเปลี่ยนสี Bromocresol purple ในจานอาหาร SM ที่มีลักษณะโคโลนีที่แตกต่างกันทั้งหมด 29 ไอโซเลท เนื่องมาจากแบคทีเรียดังกล่าวมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ไลเปสออกมาทำปฏิกิริยากับน้ำมันและไขมันจากไขมันปลาในจานอาหาร Screening medium ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ (พักตร์พิมล, 2552) ซึ่งกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของ Bromocresol purple จากสีม่วงเป็นสีเหลือง

Table 1 Characteristics of fermented fish production wasterwater.

Parameter	Average value	Maximum allowable[1/]
Temperature	27-29˚C	40˚C
pH	6.76	5.5-9.0
Biochemical oxygen demand (BOD)	610 mg/L	20 mg/L
Chemical oxygen demand (COD)	1,700 mg/L	120 mg/L
Fat Oil and Grease (FOG)	990 mg/L	5 mg/L
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)	375.76 mg/L	100 mg/L
Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS)	1,300 mg/L	50 mg/L
Mixed Liquor Volatile Suspended Solids (MLVSS)	994.33 mg/L	-

Note: 1/ Pollution Control Department, 2560

ผลของการคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไลเปส

จากการนำแบคทีเรียที่คัดแยกได้ทั้งหมด 29 ไอโซเลท มาทดสอบความสามารถในการผลิตเอนไซม์ไลเปสบนจานอาหาร TA เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าดัชนีเอนไซม์ไลเปส พบว่าแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายไตรบิวไทรินบนจานอาหาร TA แล้วเกิดโซนใสรอบโคโลนี (Clear zone) (Figure 1) ที่สามารถวัดได้ มีทั้งหมด 6 ไอโซเลท ได้แก่ WS1, WA6, WA9, WA11, WL12 และ WL13 ซึ่งการเกิดโซนใสบริเวณรอบ ๆ โคโลนีเป็นผลมาจากแบคทีเรียมีการปล่อยเอนไซม์ไลเปสออกมาภายนอกเซลล์แล้วทำปฏิกิริยาย่อยสลายไตรบูไทรินซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอน (พักตร์พิมล, 2552) ทำให้มองเห็นเป็นสีใสเกิดขึ้นรอบโคโลนี จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีเอนไซม์ไลเปส (lipase enzyme index) พบว่า ไอโซเลท WL12 ให้ผลค่าดัชนีเอนไซม์ไลเปสมากที่สุดเท่ากับ 2.86 (Table 2) จากงานวิจัยของจันทรนาถ (2548) ที่ได้คัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสจากตัวอย่างดินและน้ำ พบแบคทีเรียที่มีขนาดโซนใสสูงที่สุดเท่ากับ 13.0 มิลลิเมตร และ Kalyani and Sarawathy (2014) ได้คัดเลือกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสจากดินที่ปนเปื้อนน้ำมันจากเมืองโคอิมบาโตร์ ประเทศอินเดีย พบแบคทีเรียที่มีขนาดโซนใสสูงที่สุดเท่ากับ 11.0 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางโซนใสมีขนาดเล็กกว่าทั้ง 6 ไอโซเลท

ผลของกิจกรรมเอนไซม์ไลเปส

จากการนำแบคทีเรียที่เกิดโซนใสบริเวณรอบ ๆ โคโลนีทั้ง 6 ไอโซเลท มาวิเคราะห์หาค่ากิจกรรมเอนไซม์ไลเปส (Lipase activity) โดยการไทเทรตด้วย 0.05 N NaOH พบว่าไอโซเลท WL12 มีค่ากิจกรรมเอนไซม์ไลเปสสูงที่สุดเท่ากับ 151.45 หน่วยต่อมิลลิลิตร (Table 2) โดย 1 หน่วยของกิจกรรมเอนไซม์ไลเปสหมายถึงความสามารถของแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์ไลเปสออกมาย่อยสลายน้ำมันและไขมันให้ได้เป็นกรดไขมันในรูปของกรดโอเลอิค 1 ไมโครโมล ในเวลา 1 ชั่วโมง (เกรียงไกร, 2545) ซึ่งกิจกรรมเอนไซม์ไลเปสจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันและไขมัน (สุรอรรถ, 2543) จากงานวิจัยของนภัสพร (2551) ได้ทำการคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายน้ำมันและไขมันจากตัวอย่างดินและน้ำบริเวณรอบโรงงานผลิตปลาส้มในพื้นที่จังหวัดพะเยา พบแบคทีเรียที่เกิดกิจกรรมเอนไซม์ไลเปสที่สูงที่สุดเพียง 55.0 หน่วยต่อมิลลิลิตร และ Pallavi *et al*. (2015) ได้ทำการคัดแยกแบคทีเรียจากดินที่ปนเปื้อนน้ำมัน พบแบคทีเรียที่เกิดกิจกรรมเอนไซม์ไลเปสสูงที่สุดเท่ากับ 85.0 หน่วยต่อมิลลิลิตร

Table 2 Lipase enzyme index and Lipase activity (Unit/ml)

Isolates	Diameter of clear zone (mm)	Diameter of colony (mm)	Lipase enzyme index	Lipase activity (Unit/mL)
WS1	13.50	6.20	2.17	126.12
WA6	18.20	6.50	2.80	150.90
WA9	15.80	8.20	1.92	119.36
WA11	16.25	8.25	1.96	137.36
WL12	22.90	8.00	2.86	151.45
WL13	14.00	5.30	2.64	141.89

ผลของการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและระบุสายพันธุ์ของแบคทีเรีย

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่าแบคทีเรียส่วนใหญ่ย้อมติดสีแกรมบวก (Gram positive) มีรูปร่างท่อน (Rod) เรียงตัวกระจัดกระจาย (Singles) (Figure 1) และนำไประบุสายพันธุ์ของแบคทีเรียโดยเทคนิค Single 16s ribosomal DNA (rDNA) (Table3) แบคทีเรียกลุ่ม Bacillus และ Staphylococcus สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง 30-45 องศาเซลเซียส พีเอชระหว่าง 2-11 และต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต จึงสามารถพบแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้ตามธรรมชาติ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Prasad and Manjunate (2011) ซึ่งพบแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ไลเปสได้แก่ *Bacillus subtilis, B. licheniformis, B. amyloliquefaciens, Serratia marsescens, Pseudomonas aeruginosa* และ *Staphylococcus aureus* โดยคัดแยกได้จากตัวอย่างดินและน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันและไขมันจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม, โรงงานนม, โรงฆ่าสัตว์, โรงงานผลิตสบู่ และหอพัก และจากงานวิจัยของ อุษา และ ปราณี (2554) รายงานว่ามีแบคทีเรียหลายชนิด เช่น *Bacillus subtilis, Pseudomonas aeruginosa, Acinetobacter calcoaceticus* และ *Burkholderia cepacia* สามารถผลิตเอนไซม์ไลเปสได้ ซึ่งแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ไลเปสจะผลิตเอนไซม์ไลเปสออกมานอกเซลล์เพื่อไปจับกับโมเลกุลของน้ำมันและไขมัน แล้วเกิดการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอล และหมู่คาร์บอกซิลของกรดไขมัน หากเกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและกรดไขมัน (มาริสา, 2560)

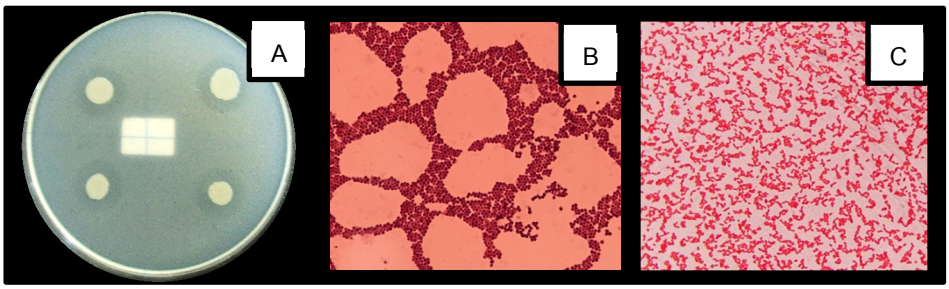


Figure 1 A, Bacteria isolate show clear zone around colony on TA; B, Gram positive coccus (*Staphylococcus warneri*) and C, Gram negative rod (*Bacillus* sp.)

Table 3 Bacteria species identified using Single 16s ribosomal DNA (rDNA)

Isolates	Gram stain	Shape	Arrangement	Bacteria species identified
WS1	+	Coccus	Staphylococcus	*Staphylococcus cohnii*
WA6	+	Rod	Singles	*Bacillus* sp.
WA9	-	Rod	Singles	*Burkholderia multivorans*
WA11	-	Rod	Singles	Enterobacteriaceae
WL12	+	Coccus	Staphylococcus	*Staphylococcus warneri*
WL13	+	Rod	Singles	*Bacillus* sp.

สรุป

คุณลักษณะน้ำเสียการผลิตปลาส้ม จากสถานที่ผลิตปลาส้มบ้านสันเวียงใหม่ จังหวัดพะเยา มีค่าเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ.2560 ซึ่งมีปริมาณน้ำมันและไขมันเท่ากับ 990 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงควรได้รับการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม และจากการคัดแยกแบคทีเรียจากตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตปลาส้มในจังหวัดพะเยา ทั้งหมด 4 จุด พบแบคทีเรียที่สามารถเปลี่ยนสี Bromocresol purple ในจานอาหาร SM และมีลักษณะโคโลนีที่แตกต่างกันทั้งหมด 29 ไอโซเลท และเมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการผลิตเอนไซม์ไลเปสบนจานอาหาร TA พบแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายไตรบิวไทริน แล้วเกิดโซนใสรอบโคโลนี (Clear zone) ที่สามารถวัดได้ มีทั้งหมด 6 ไอโซเลท จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าดัชนีเอนไซม์ไลเปส และค่ากิจกรรมเอนไซม์ไลเปส พบว่า *Staphylococcus warneri* มีค่าดัชนีเอนไซม์ไลเปสและค่ากิจกรรมเอนไซม์ไลเปสสูงที่สุดเท่ากับ 2.86 และ 151.45 หน่วยต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้คัดเลือกแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ไลเปสจากน้ำเสียการผลิตปลาส้มในจังหวัดพะเยา เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันและไขมันโดยวิธีการทางชีวภาพด้วยแบคทีเรียที่คัดแยกได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาประจำปี 2559 และขอขอบคุณทุนอุดหนุนหารทำวิทยานิพนธ์ปีการศึกษา 2558 จากมหาวิทยาลัยพะเยา

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2560. **ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุม การระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ.2560.** 7 มิถุนายน 2560.

เกรียงไกร พัทยากร. 2545. **การใช้จุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสในกรบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือนที่ปนเปื้อนไขมัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จันทรนาถ พลชำนิ. 2548. **สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยไลเปสจากแบคทีเรีย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณภัทร พิทักษ์รุ่งโรจน์, จันทร์จิรา ขาสุวรรณ, จารุญศรี พุ่มเทียน และปิยภรณ์ สุภัคดำรงกุล. 2558. การคัดแยกเชื้อและการทดสอบแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสและสารลดแรงตึงผิวชีวภาพจากแหล่งปนเปื้อนน้ำมันในโรงงานอุตสาหกรรม. **การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน** น. 3 (1): 449-455.

นภัสพร พันธุ์ทอง. 2551. **การสลายไขมันจากกระบวนการผลิตปลาส้มด้วยแบคทีเรียที่สลายลิพิดและการประยุกต์เพื่อการบำบัดน้ำเสีย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พักตร์พิมล อึ่งเจริญวิวัฒน์. 2552. **การคัดเลือกและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอนไซม์ไลเปสของแบคทีเรียที่แยกได้จากน้ำเสียโรงงานผลิตปลากระป๋องและการประยุกต์ใช้**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พจน์ ศรีบุญลือ, พัชรี บุญศิริ, ชฎามาศ พินิจสุนทร และเปรมใจ อารีจิตรานุสรณ์. 2555. **ตำราชีวเคมี**. พิมพ์ครั้งที่ 6. โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา, ขอนแก่น

มาริสา อัตถาพงศ์. 2560. **การศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสในการย่อยสลายน้ำมันและไขมันในน้ำเสียสังเคราะห์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยพะเยา.

สุรอรรถ ศุภจัตุรัส. 2543. **การศึกษาการใช้จุลินทรีย์ผลิตเอนไซม์ไลเปสเพื่อใช้บำบัดไขมันในระบบบำบัดน้ำเสีย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุวัฒน์ศักดิ์ ด่านศักดิ์ดา. 2551. **การศึกษาประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสในการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโรงงานปลาส้ม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

อัจฉรา คอประเสริฐศักดิ์. 2542. **การศึกษาแบคทีเรียผลิตเอนไซม์ไลเปสที่มีผลต่อการย่อยสลายน้ำมันและน้ำเสียประเภทไขมันสูง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรอุษา รุ่งเรือง และ ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล. 2554. **การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนไขมันด้วยเซลล์แบคทีเรียตรึงรูปและไลเปสตรึงรูปต่าง ๆ**. การศึกษาอิสระ ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

Bala, J. D., J. Lalung and N. Ismai. 2014. Biodegradation of palm oil mill effluent (POME) by bacterial. **International Journal of Scientific and Research Publications** 4 (3).

Kalyani, N. and N. Sarawathy. 2014. Production of extracellular lipase by a new strain *Staphylococcus aureus* NK-LB37 isolate from oil contaminated soil. **African Journal of Biotechnology** 13 (28): 2858-2866.

Lauprasert, P., J. Chansirirattana and J. Paengjan. 2017. Effect of Selected Bacteria as Bioremediation on the Degradation of Fats Oils and Greases in Wastewater from Cafeteria Grease Traps. **European Journal of Sustainable Development** 6 (2):181-186.

Prasad, M.P. and K. Manjunath. 2011. Comparative study on biodegradation of lipid-rich wastewater using lipase producing bacteria species. **India Journal of biotechnology** 10: 121-124

Pallavi, P., T. Ravikumar and S. Ram Reddy. 2015. Isolation and characterization of lipase producing bacteria for biodegradation of oil contamination. **International journal of Corret Research and Academic Review** 3 (8): 56-66.

การใช้ประโยชน์และการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลน กรณีศึกษา บ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา

The Utilization and Participation of the Public in The Conservation and Restoration of Mangrove Forests in Ban Klang, Bangtoey Subdistrict, Muang District, Phang-nga Province

ธิดารัตน์ คำล้อม[1*] นิติญา สังขนันท์[1] และ นงนภัส สกุลมา[1]

Tidarat Kumlom[1*], Nitiya Sangkhanan[1] and Nongnapat Saklunmal[1]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์ทรัพยากรในบริเวณพื้นที่ป่าชายเลนบ้านกลาง และศึกษาระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนของประชาชนบ้านกลาง โดยศึกษาประชากรทุกครัวเรือนที่อาศัยอยู่ หมู่ 6 บ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา จำนวน 199 ครัวเรือน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยคือ แบบสอบถาม สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ ค่าความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการศึกษา พบว่าปลาที่จับได้มากที่สุดคือ ปลากระบอก (ร้อยละ 41.18) หอยที่จับได้มากที่สุด คือ หอยจุ๊บแจง (ร้อยละ 32.75) กุ้งที่จับได้มากที่สุด คือ กุ้งแชบ๊วย (ร้อยละ 51.58) ปูที่จับได้มากที่สุด คือ ปูดำ (ร้อยละ 75.00) พบพันธุ์ไม้ที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดคือ แสม (ร้อยละ 32.87) ระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนบ้านกลาง จัดอยู่ในระดับการมีส่วนร่วมปานกลาง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.22 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.81

ABSTRACT

This research aims to study the utilization of resources in the mangrove forest area of Ban Klang and study the level of participation in conservation and rehabilitation of the mangrove forests of Ban Klang people. All 199 households living in Mu 6, Ban Klang, Bangtoey Subdistrict, Muang District, Phang-nga Province were studied. The tool used in the research was questionnaire and data analysis was frequency, percentage, mean, and standard deviation. The results showed that the highest catching of fish, shell, shrimp, and crab was *Mugil dussumieri* (41.18%), *Cerithidea sp.* (32.75%), *Penaeus indicus* (51.58%). and *Scylla serrata* (75.00%), respectively. Most of the trees used were *Avicennia alba* (32.87%). Participation in conservation and rehabilitation of mangrove forest was classified as moderate participation with the mean value of 2.22 and the standard deviation of 0.81.

Key Words: the utilization, public participation, mangrove forests

*Corresponding author; e-mail address :**tidarat.k@pkru.ac.th**

[1]สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต 83000

[1]Environmental science Program, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University 83000

คำนำ

ป่าชายเลนเป็นระบบนิเวศที่อยู่ในแนวเชื่อมต่อ ระหว่างผืนแผ่นดินกับพื้นน้ำทะเลในเขตร้อน และกึ่งร้อนของโลก ประกอบด้วย สังคมพืชและสัตว์น้ำหลายชนิด ดำรงชีวิตร่วมกันภายใต้สภาพแวดล้อมที่เป็นดินเลนน้ำกร่อย และมีน้ำทะเลท่วมถึงอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้น ป่าชายเลนจะพบได้ในบริเวณที่เป็นชายฝั่งทะเล ปากแม่น้ำ อ่าว ทะเลสาบ และรอบเกาะแก่งต่าง ๆ ป่าชายเลน เป็นระบบนิเวศที่มีความเฉพาะตัวและมีความหลากหลายทางชีวภาพสูง เป็นองค์ประกอบที่สำคัญยิ่งของชายฝั่งทะเล นับเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่ามหาศาลทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมของประเทศ (พูลศรี, 2556)

ป่าชายเลนเป็นแหล่งอาหารสำคัญของมนุษย์เนื่องจากเป็นที่ที่สิ่งมีชีวิตในทะเล เช่น ปลา ปู กุ้ง และหอยนานาชนิด เข้ามาอาศัยหลบภัย เจริญเติบโต สืบพันธุ์และวางไข่ และไม้ในบริเวณป่าชายเลนยังสามารถนำมาสร้างบ้านเรือน อุปกรณ์ต่าง ๆ ใช้เป็นเชื้อเพลิง และยารักษาโรค รวมถึงป่าชายเลนยังเป็นแนวป้องกันการกัดเซาะ ชายฝั่งทะเล และลดความรุนแรงของคลื่น น้ำทะเลที่กระทบกับชายฝั่งได้อีกด้วย ดังนั้นเมื่อป่าชายเลนถูกทำลายหรือเสื่อมโทรมลง จะส่งผลให้ระบบนิเวศป่าชายเลนเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่ใช่ประโยชน์จากทรัพยากรป่าชายเลน จึงมีความสำคัญอย่างมากที่ต้องเร่งดำเนินการศึกษาวางแผนการใช้ และจัดการทรัพยากรป่าชายเลนอย่างถูกต้องและยั่งยืนต่อไป (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2559)

ป่าชายเลนบ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา มีบางพื้นที่ที่ป่าชายเลนมีความเสื่อมโทรมอย่างมาก อันเนื่องมาจากการสัมปทานเหมืองแร่ ช่วงปี 2522 – 2532 ส่งผลให้ปริมาณสัตว์น้ำมีจำนวนลดลง ซึ่งส่งผลกระทบอย่างมากต่อการดำรงชีวิตของประชาชนในชุมชน ทำให้ประชาชนบ้านกลางมีการรวมกลุ่มกันในการฟื้นฟูและพัฒนาระบบนิเวศชายฝั่งขึ้นในปี 2535 ชุมชนมีการแบ่งโซนในการอนุรักษ์ ใช้สอย และมีการปลูกเสริมป่าอย่างต่อเนื่อง อย่างน้อยปีละครั้ง และได้มีการจัดตั้งป่าชุมชน โดยใช้ชื่อว่า ป่าชุมชนบ้านกลาง อีกทั้งยังมีเส้นทางศึกษาธรรมชาติป่าชายเลน ที่มีความยาวของเส้นทางศึกษาธรรมชาติ 884 เมตร อีกด้วย (ไชยภูมิ, 2554) ประกอบกับในปัจจุบัน ประชาชนในชุมชนได้มีการอนุรักษ์และร่วมมือกันฟื้นฟูป่าชายเลน ทำให้ป่าชายเลนบ้านกลางมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น และเป็นแหล่งอนุบาลสัตว์น้ำตามธรรมชาติ ทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาการใช้ประโยชน์และการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนของประชาชนบ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการส่งเสริมและสนับสนุนการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนให้คงสภาพความอุดมสมบูรณ์ เพื่อการใช้ประโยชน์ของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตได้อย่างยาวนานและยั่งยืนสืบไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยนี้เป็นวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research) โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูลกับประชาชนจำนวน 199 ครัวเรือน ซึ่งเก็บข้อมูลทุกครัวเรือนที่อาศัยอยู่ในหมู่ 6 บ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ แบบสอบถาม แบ่งออกเป็น 3 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ตอนที่ 2 การใช้ประโยชน์ทรัพยากรในบริเวณพื้นที่ป่าชายเลนบ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา และตอนที่ 3 ศึกษาระดับการมีส่วนร่วม ในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลน บริเวณพื้นที่บ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา เก็บรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถามนำมาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าความถี่ (Frequency) ร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard

Deviation) ในการวัดระดับการมีส่วนร่วม 4 ระดับ คือ ระดับ 1 หมายถึง ไม่มีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลน ระดับ 2 หมายถึง มีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนน้อย ระดับ 3 หมายถึง มีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนปานกลาง และระดับ 4 หมายถึง มีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนมาก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาเรื่องการใช้ประโยชน์และการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์ และฟื้นฟู ป่าชายเลน กรณีศึกษา บ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา แบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป พบว่า ประชาชนผู้ตอบแบบถามส่วนใหญ่เป็นเพศชาย (ร้อยละ 52.76) มีอายุ 31-40 ปี (ร้อยละ 36.18) เนื่องจากช่วงวัยนี้แข็งแรงและมีกำลังในการทำประมงมากกว่าช่วงวัยอื่น ๆ ส่วนใหญ่มีการศึกษาระดับประถมศึกษา (ร้อยละ 34.67) ประกอบอาชีพเกษตรกรรม (ร้อยละ 39.70) เนื่องจากอาชีพเกษตรกรเป็นอาชีพหลักของคนในชุมชน เช่น การทำสวนยางพารา การทำประมง เป็นต้น ระยะเวลาที่อาศัยอยู่ในชุมชน ส่วนใหญ่คือ 20 ปีขึ้นไป (ร้อยละ 49.25) และมีสมาชิกในครัวเรือน 6-10 คน (ร้อยละ 58.79) ตามลำดับ ผู้ชายมีการเข้าไปใช้ประโยชน์และมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟู ป่าชายเลนมากกว่าผู้หญิง (ร้อยละ 52.76) เนื่องจากผู้ชายมีหน้าที่ออกเรือทำประมงและใช้ประโยชน์จากทรัพยากรในป่าชายเลน เช่น ออกหาปลา ซึ่งทำให้มีความรู้เกี่ยวกับสัตว์น้ำและพันธุ์ไม้ในป่าชายเลนมากกว่าผู้หญิง

ตอนที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ทรัพยากรในบริเวณพื้นที่ป่าชายเลนบ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา

การใช้ประโยชน์ทรัพยากรในบริเวณพื้นที่ป่าชายเลน พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมดเคยใช้ประโยชน์จากป่าชายเลน โดยเข้าไปใช้ประโยชน์จากเส้นทางศึกษาธรรมชาติบ้านกลาง ซึ่งมีระยะทางทั้งหมด 884 เมตร โดยกิจกรรมที่ทำมากที่สุด คือ ศึกษาพันธุ์ไม้ต่างๆ ในป่าชายเลน (ร้อยละ 27.14) ในกรณีการเข้าไปใช้ประโยชน์จากพื้นที่ในบริเวณป่าชายเลนบ้านกลางเป็นแหล่งท่องเที่ยวและพักผ่อนหย่อนใจพบมากที่สุดคือ ตกปลาบริเวณป่า ชายเลน (ร้อยละ 41.71) (Table 1)

Table 1 Percentage of resources utilization in the mangrove forest area of Ban Klang

Utilization	Frequency	Percent
Utilization of the nature trail (884 meters total distance)		
Study of ecosystems in mangrove forest	43	21.61
Study of trees species in mangrove forest	54	27.14
Study of aquatic animal species in mangrove forest	52	26.13
Study of land animal species in mangrove forest	50	25.12
Total	**199**	**100.00**
Utilization of the mangrove forest area for tourism and recreation		
Nature walk in mangrove forest	65	32.66
Nature canoeing around mangrove forest	51	25.63
Fishing around mangrove forest	83	41.71
Total	**199**	**100.00**

กิจกรรมต่าง ๆ เหล่านี้ สืบเนื่องมาจากที่ชุมชนบ้านกลางได้จัดทำเส้นทางศึกษาธรรมชาติไว้ เพื่อให้บุคคลที่สนใจได้เข้ามาชมธรรมชาติในบริเวณป่าชายเลนบ้านกลาง ซึ่งไชยภูมิ (2554) ได้กล่าวไว้ว่า สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ได้สนับสนุนงบประมาณให้กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง ดำเนินการก่อสร้างเส้นทางศึกษาธรรมชาติป่าชายเลนบ้านกลางจำนวน 4,000,000 บาท ความยาวของเส้นทางศึกษาธรรมชาติ 884 เมตร ความกว้าง 1.30 เมตร

การใช้ประโยชน์จากสัตว์น้ำในบริเวณป่าชายเลนบ้านกลาง พบว่าปลาที่จับได้มากที่สุดคือ ปลากระบอก (ร้อยละ 41.18) การนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุดคือ ด้านการประกอบอาหาร (ร้อยละ 56.92) ตามที่นภดล (2554) ได้กล่าวไว้ว่า ปลากระบอกจะพบได้ตามชายฝั่งทะเล และจะชอบอยู่รวมกันเป็นฝูง ซึ่งสภาพแวดล้อมของชุมชนบ้านกลางมีความอุดมสมบูรณ์จึงทำให้สามารถพบปลากระบอกได้มาก หอยที่จับได้มากที่สุดคือ หอยจุ๊บแจง (ร้อยละ 32.75) การนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุดคือ ด้านการประกอบอาหาร (ร้อยละ 56.61) เนื่องจากหอยจุ๊บแจงอาศัยในป่าชายเลนหากินตามพื้นเลน และชอบอาศัยอยู่รวมกัน ทำให้สามารถจับหอยจุ๊บแจงได้ครั้งละจำนวนมาก กุ้งที่จับได้มากที่สุดคือ กุ้งแชบ๊วย (ร้อยละ 51.58) การนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุดคือ ด้านการประกอบอาหาร (ร้อยละ 53.28) เนื่องจากกุ้งแชบ๊วยเป็นกุ้งที่อาศัยตามชายฝั่งทะเล และจะพบมากที่สุดตามพื้นดินเลน ปูที่จับได้มากที่สุดคือ ปูดำ (ร้อยละ 75.00) การนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุดคือ ด้านการประกอบอาหาร (ร้อยละ 52.11) เนื่องจากสามารถพบปูดำได้ในบริเวณป่าชายเลน โดยขุดรูอยู่ตามชายทะเลริมฝั่งที่เป็นโคลน รายละเอียดดัง Table 2 ซึ่งสอดคล้องกับณัฐติกานต์ (2558) ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์และการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์ป่าชายเลน กรณีศึกษา ชุมชนบ้านเกาะกลาง ตำบลคลองประสงค์ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่ พบว่า การใช้ประโยชน์พื้นที่ป่าชายเลนทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยปลาที่จับได้มากที่สุด คือ ปลากระบอก ปูที่จับได้มากที่สุด คือ ปูดำ กุ้งที่จับได้มากที่สุด คือ กุ้งแชบ๊วย และหอยที่จับได้มากที่สุด คือ หอยจุ๊บแจง ซึ่งการนำไปใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ นำไปประกอบอาหาร เครื่องมือที่ใช้ในการจับสัตว์น้ำมากที่สุดคือ แห (ร้อยละ 32.08) ตามที่จุฑามาศ (2558) ได้กล่าวว่า แหเป็นเครื่องมือที่สามารถจับปลาได้จำนวนมาก ซึ่งชาวบ้านส่วนใหญ่นิยมใช้กัน และสถานที่ที่พบสัตว์น้ำมากที่สุดคือ บริเวณ ป่าชายเลน (ร้อยละ 45.62) เนื่องจากระบบนิเวศป่าชายเลนเป็นระบบนิเวศขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบมากมายทำให้สามารถพบสัตว์น้ำในบริเวณป่าชายเลนได้ในจำนวนมาก

Table 2 Percentage of catches per species

Type	Frequency	Percent
FISH		
Sillaginidae argentifasciata	54	28.88
Lates calcarifer	32	17.11
Mugilidae	77	41.18
Plotosus	24	12.83
SHELL		
Cerithidea obtuse (Lamarck 1822)	112	32.75
Laevistrombus canarium	89	26.02

Type	Frequency	Percent
Babylonia areolata	56	16.38
Anadara granosa	85	24.85

Table 2 (Continued)

Type	Frequency	Percent
SHIRMP		
Euphausiacea	53	33.33
Penaeus monodon	24	15.09
Fenneropenaeus merguiensis	82	51.58
CRAB		
Portunus pelagicus	44	25.00
Scylla serrata	132	75.00

ชนิดของพันธุ์ไม้ที่มีการนำมาใช้ประโยชน์มีทั้งหมด 14 ชนิด ได้แก่ โกงกาง โปรงขาว โปรงแดง ถอบแถบน้ำ พังกาหัวสุม แสม ลำพูทะเล ตะบูน เป้งทะเล ปรงทะเล จาก เหงือกปลาหมอ และตาตุ่มทะเล ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้ พันธุ์ไม้ที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดคือ แสม (ร้อยละ 32.87) มีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านสร้างที่อยู่อาศัยมากที่สุด (ร้อยละ 64.79) เนื่องจากแสม เป็นไม้เนื้อแข็งมีขนาดกลางถึงใหญ่ และพบได้มากกว่าพันธุ์ไม้ชนิดอื่น ชาวบ้านส่วนใหญ่จึงนิยมนำมาสร้างที่อยู่อาศัย ซึ่งแตกต่างกับการศึกษาของ เกตุวดี และ ธิดารัตน์ (2560) ได้ทำการศึกษา การใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าชายเลนและการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่า ชายเลน ตำบลเขาไม้แก้ว อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง พบว่าการใช้ประโยชน์ทรัพยากรด้านป่าไม้ ชนิดและจำนวนต้นที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด คือ ต้นโกงกางใบเล็ก การใช้งานมากที่สุด คือ ก่อสร้างบ้าน ทั้งนี้เนื่องจากต้นโกงกาง ใบเล็ก มีจำนวนมากกว่าไม้ชนิดอื่น ๆ และความแข็งแรง ทนทานดีกว่าไม้อื่น ๆ รองลงมาคือ โกงกาง (ร้อยละ 30.55) ตะบูน (ร้อยละ 18.06) ลำพูทะเล (ร้อยละ 2.08) จาก (ร้อยละ 1.39) โปรงขาว (ร้อยละ 0.93) และโปรงแดง (ร้อยละ 0.69) นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านสร้างที่อยู่อาศัยมากที่สุด นอกจากนั้นยังพบเหงือกปลาหมอ (ร้อยละ 6.02) ถอบแถบน้ำ (ร้อยละ 3.01) ตาตุ่มทะเล (ร้อยละ 1.85) และปรงทะเล (ร้อยละ 0.23) มีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านยารักษาโรคมากที่สุด เป้งทะเล (ร้อยละ 1.39) มีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านสร้างเครื่องมือประมงมากที่สุด พังกาหัวสุ่ม (ร้อยละ 0.93) มีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านสร้างกระชังปลามากที่สุด (Table 3)

ตอนที่ 3 การมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนบริเวณพื้นที่บ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา

การมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนบริเวณพื้นที่บ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา พบว่าทั้งหมดเคยเข้าไปมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนบ้านกลาง ระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนบ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา โดยภาพรวมอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.22 แสดงให้เห็นว่าประชาชนมีความรู้ความเข้าใจในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชาย

เลน และมีการร่วมมือกันในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนบ้านกลางเป็นอย่างดี โดยในแต่ละด้านมีส่วนร่วมอยู่ในระดับต่าง ๆ ดังนี้

Table 3 Frequency and percentage of used trees in mangrove forest

Tree Species	Utilization						
	Dwelling	Bridge	Fish Cage	Fishery Instrument	Medicine	Frequency	Percent
Rhizophora ucronata	65.91	4.55	16.67	12.88	0	132	30.55
Ceriops decandra	75.00	25.00	0	0	0	4	0.93
Ceriops tagal	66.67	33.33	0	0	0	3	0.69
Derris trifoliata Lour.	0	0	0	0	100.00	13	3.01
Bruguiera gymnorrhiza	25.00	0	50.00	25.00	0	4	0.93
Avicennia officinalis	64.79	11.97	5.63	17.61	0	142	32.87
Excoecaria agallocha	44.44	11.11	22.22	22.22	0	9	2.08
Xylocarpus granatum	67.95	5.13	15.38	11.54	0	78	18.06
Phoenix paludosa	0	0	0	83.33	16.67	6	1.39
Cycas rumphii	0	0	0	0	100.00	1	0.23
Cycas rumphii	100.00	0	0	0	0	6	1.39
Acanthus ebracteatus	0	0	0	0	100.00	26	6.02
Excoecaria agallocha	25.00	0	12.50	12.50	50.00	8	1.85

ด้านการมีส่วนร่วมในการริเริ่มกิจกรรม อยู่ในระดับการมีส่วนร่วมปานกลาง ค่าเฉลี่ย 2.19 ส่วนใหญ่เข้าร่วมศึกษาสภาพพื้นที่และความสมบูรณ์ของป่าชายเลนบ้านกลางมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.28 และการมีส่วนร่วมศึกษาการป้องกัน และแนวทางในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลน เพื่อแก้ไขปัญหาป่าชายเลนเสื่อมโทรมน้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.88 อาจเป็นเพราะชาวบ้านไม่ค่อยมีเวลาเนื่องจากต้องทำงานของตนเอง จึงทำให้ไม่ค่อยได้เข้ามามีส่วนร่วมศึกษาการป้องกัน และแนวทางในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ณัฐติกานต์ (2558) ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์และการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์ป่าชายเลน กรณีศึกษา ชุมชนบ้านเกาะกลาง ตำบลคลองประสงค์ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่ พบว่าประชาชนไม่ค่อยมีเวลาเข้าร่วมวางแผนโครงการ เนื่องจากประชาชนในชุมชนต้องพึ่งพาตัวเองในการประกอบอาชีพ จึงทำให้ไม่ค่อยมีเวลามาเข้าร่วม

ด้านการมีส่วนร่วมในการวางแผนกิจกรรม อยู่ในระดับการมีส่วนร่วมปานกลาง ค่าเฉลี่ย 2.15 ส่วนใหญ่มีส่วนร่วมประชุมวางแผนในการกำหนดกิจกรรมการอนุรักษ์และฟื้นฟู ป่าชายเลนบ้านกลาง เช่น กิจกรรมการ

ปลูก ป่าชายเลนที่จัดขึ้นเนื่องในวันที่ 12 สิงหาคม วันแม่แห่งชาติมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.30 และมีส่วนร่วมเป็นกรรมการในโครงการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนบ้านกลางน้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.95 เนื่องจากประชาชนยังไม่พร้อม และขาดประสบการณ์ในการเป็นกรรมการซึ่งการเป็นกรรมการต้องมีหน้าที่รับผิดชอบมาก ทำให้ประชาชนมีส่วนร่วมเป็นกรรมการในโครงการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนบ้านกลางน้อยที่สุด

ด้านการมีส่วนร่วมในการปฏิบัติกิจกรรม อยู่ในระดับการมีส่วนร่วมปานกลาง ค่าเฉลี่ย 2.23 ส่วนใหญ่มีส่วนร่วมกิจกรรมการฟื้นฟูป่าชายเลน เช่น กิจกรรมการปลูกป่าชายเลนที่จัดขึ้นเนื่องในวันที่ 12 สิงหาคม วันแม่แห่งชาติมากที่สุด และมีส่วนร่วมในการจัดค่ายอนุรักษ์ป่าชายเลนกับทางหน่วยงานต่าง ๆ ที่เข้ามาร่วมกันปลูกป่าชายเลน เช่น ค่ายเยาวชนกล้ายิ้ม น้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.95 อาจเป็นเพราะชาวบ้านได้รับรู้ข้อมูลข่าวสารน้อย เนื่องจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องประชาสัมพันธ์น้อยไม่ค่อยทั่วถึงทำให้มีประชาชนที่มาเข้าร่วมน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ราตรี และคณะ (2558) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน พื้นที่หาดสระบัว ตำบลท่าศาลา อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าประชาชนไม่ค่อยได้รับรู้ข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับการอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลนจากสื่อบุคคล สื่อมวลชน และสิ่งพิมพ์

ด้านการมีส่วนร่วมในการรับผลประโยชน์ อยู่ในระดับการมีส่วนร่วมมาก ค่าเฉลี่ย 2.31 ส่วนใหญ่มีส่วนร่วมใช้ทรัพยากรป่าชายเลนอย่างมีเหตุผลและเป็นไปตามกฎระเบียบข้อบังคับของชุมชน เช่น นำไม้มาสร้างบ้าน โดยการตัดไม้ 1 ต้น ต้องทำการปลูกทดแทน 5 ต้นมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.32 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของโชติ (2554) ได้ศึกษาองค์กรชุมชนในการจัดการป่าชายเลน อ่าวป่าคลอก จังหวัดภูเก็ต พบว่า ประชาชนมีการกำหนดกติกาในการรักษาป่าชายเลน จัดทำสื่อเผยแพร่ และกระตุ้นให้ประชาชนเห็นความสำคัญของป่าชายเลน

สรุป

การใช้ประโยชน์ทรัพยากรในบริเวณพื้นที่ป่าชายเลน พบว่าปลาที่จับได้มากที่สุดคือ ปลากระบอก (ร้อยละ 41.18) หอยที่จับได้มากที่สุด คือ หอยจุ๊บแจง (ร้อยละ 32.75) กุ้งที่จับได้มากที่สุด คือ กุ้งแชบ๊วย (ร้อยละ 51.58) ปูที่จับได้มากที่สุด คือ ปูดำ (ร้อยละ 75.00) และการศึกษาการเข้าไปใช้ประโยชน์จากพันธุ์ไม้ในบริเวณป่าชายเลนบ้านกลาง พบว่าพันธุ์ไม้ที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดคือ แสม (ร้อยละ 32.87) ระดับการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนบ้านกลาง จัดอยู่ในระดับการมีส่วนร่วมปานกลาง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.22 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.81 ส่วนข้อเสนอแนะในการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลน คือ ควรมีการประชาสัมพันธ์เกี่ยวกับกิจกรรมต่าง ๆ ในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนมากกว่านี้ เพื่อให้ประชาชนได้ทราบข้อมูลข่าวสารอย่างทั่วถึง มีการจัดกิจกรรมในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลนเพิ่มเติมจากกิจกรรมที่จัดขึ้นในวันสำคัญต่าง ๆ เพื่อให้ทุกคนในชุมชนได้เข้ามามีส่วนร่วมในการดูแลป่าชายเลนมากยิ่งขึ้น และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องควรเข้ามาจัดการกับผู้บุกรุกป่าชายเลนอย่างจริงจัง รวมถึงประชาชนต้องช่วยกันติดตามและดูแลต้นไม้จากการปลูกป่าชายเลนเพื่อให้ป่าชายเลนยังคงอยู่กับลูกหลานชุมชนบ้านกลางต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต และที่สำคัญคือ ขอขอบคุณผู้นำชุมชนและชาวบ้าน หมู่ที่ 6 บ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา และองค์การบริหารส่วนตำบล ที่ได้ให้ข้อมูลต่างๆ และมีส่วนร่วมที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัยในครั้งนี้ และทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

เกตุวดี จันวินิจ และธิดารัตน์ คำล้อม. 2560. การศึกษาใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าชายเลนและการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลน ตำบลเขาไม้แก้ว อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง, น.294-303. *ใน* **รายงาน การประชุมการป่าไม้ ประจำปี พ.ศ. 2560**. โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนแวนชั่น, กรุงเทพฯ.

จุฑามาศ เดชบุรัมย์. 2558. **การสานแห**. แหล่งที่มา: http://purefff.blogspot.com/.1/02/2015html 15 พฤษภาคม 2560

ไชยภูมิ สิทธิวัง. 2554. **คู่มือศึกษาธรรมชาติป่าชายเลนบริเวณเส้นทางศึกษาธรรมชาติป่าชายเลนบ้านกลาง**. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง.

โชติ ถาวร. 2554. **องค์กรชุมชนในการจัดการป่าชายเลน อ่าวป่าคลอก จังหวัดภูเก็ต**. แหล่งที่มา http://www.stou.ac.th/offices/ord/pac/file/agr4.pdf, 22 กรกฎาคม 2559

ณัฐติกานต์ ชูสลับ. 2558. **การใช้ประโยชน์และการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์ป่าชายเลน กรณีศึกษา ชุมชนบ้านเกาะกลาง ตำบลคลองประสงค์ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่** .มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

นภดล มณีวัต. 2554. ปลากระบอก. แหล่งที่มา: http://www.siamsouth.com/smf/index.php?topic=24427.01,15 พฤษภาคม 2560

พูลศรี วันธงไชย. 2556. **คู่มือความรู้เรื่องป่าชายเลน**. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์บริษัท พลอยมีเดีย จำกัด, กรุงเทพฯ.

ราตรี นินละเอียด, กิติชัย รัตนะ และวิชา นิยม. 2558. ปัจจัยที่มีผลต่อการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลนพื้นที่หาดสระบัว ตำบลท่าศาลา อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช. **วารสารวนศาสตร์** 34 (2): 22-32.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2559. **ประโยชน์ของป่าชายเลน**. แหล่งที่มา: http://fieldtrip.ipst.ac.th/intro_sub_content.php?content_id=24&content_ folder_id=321, 7 สิงหาคม 2559.

Kinetics Investigation of Cr(VI) Removal by Nanocomposite Adsorbent

Sureerat Thomyasirigul[1*], Pattapol Lertsuriyakul[1], Tappitak Wangpang[1] and Udomsak Boonmeerati[1]

ABSTRACT

The objective of this research was to study the removal of Cr(VI) ions in aqueous solution using nanocomposite adsorbent by modifying sand with magnetic nanoparticles. Batch experiments of Cr(VI) adsorption were examined with regard to effect of pH, time, and adsorbent dosage. The adsorption data at pH 3 was modeled by pseudo-first order and pseudo-second order kinetics. The results showed that the adsorption process of Cr(VI) on nanocomposite followed pseudo-second-order kinetics model. The adsorption mechanisms likely involved both chemical and physical adsorption. It was confirmed that the adsorbent retaining the magnetic nanomaterial property on sand is macroscopic particle suitable for the removal of Cr(VI) in water and wastewater treatment.

Key words: Cr(VI), nanocomposite, adsorbent, kinetic

*Corresponding author; e-mail address: **sureerat.t@sciee.kmutnb.ac.th**

[1]Faculty of sciene, energy and environment, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Rayong campus, 21120.

INTRODUCTION

In the environment, chromium exists in two major stable oxidation states, hexavalent chromium (Cr(VI)) and trivalent chromium (Cr(III)). Cr(VI) is more mobile and toxic than Cr(III) and it is well known as a human genotoxic carcinogen. In some areas around the world have been found high concentrations of Cr(VI) in surface water and groundwater that may be attributed to anthropogenic activities, especially effluent from industry. Several techniques have been applied for Cr(VI) removal from aqueous solutions such as solvent extraction, ion exchange, membrane process, electrodialysis, precipitation, phytoextraction, ultrafiltration, and reverse osmosis (Owalude and Tella, 2016). However, all of these techniques are non-economical with disadvantages such as high reagent cost, high energy utilization, low selectivity, and generation of secondary wastes that require further disposal (Owalude and Tella, 2016 and Kan *et al*., 2017). Adsorption technique can solve these disadvantages and remains the most preferred method for heavy metal removal because of its easy handling, flexibility in design and operation, high efficiency, low operation cost and low residual sludge generation (Kan *et al*., 2017). Adsorbents such as activated carbon, silica and oxide-based materials usually use for heavy metal removal; however, the cost of these adsorbents is very high. In addition, these materials are small size; hence, it is tough for using in continuous flow systems. Filter sand is commonly used in water treatment and found in local as the simple and low cost material. It is promising selection as carrier because of chemically inert and optically transparent, non toxic, high strength (Chaudhry *et al*., 2016). In the present work we synthesized nanocomposite adsorbent which used magnetic nanoparticle coated on the filter sand. The synthesized adsorbent can increase surface area for increasing adsorption capability and also be able to apply in a packed bed manner for water treatment. Therefore, the objective of this research was to investigate the removal of Cr(VI) ions in aqueous solution by using synthesized nanocomposite adsorbent.

MATERIALS AND METHODS

1. Chemicals and instruments

All chemicals were of analytical grade and were used as such without any further purification. Fresh deionized water was used in all experiments for the preparation and dilution of aqueous solution. The pH of the solution measured by pH meter (Mettler Toledo, Five Easy Plus) was manually adjusted at the desired value using HCl and NaOH. Cr(VI) stock solution of 1,000 mg L^{-1} was prepared by dissolving appropriate amount of $K_2Cr_2O_7$ in deionized water. The Cr(VI) solutions of desired concentrations for further experiments as synthetic wastewater were made by diluting the stock solution. The standards and samples of quantifying Cr(VI) in solution were analyzed colorimetrically on a UV-visible spectrophotometer (Spectronic Genesys 20). The color in the solution was developed by adding 1,5-Diphenylcarbazide (DPC) performed at pH 1 and resulted in the

formation of a red-violet complex which was then absorbed at 540 nm (APHA *et al*., 2012). The sand used in this experiment was dry river sand where the particle size of the sand was sieved by Sieve Shaker (Retsch, AS 200 Digit cA). A Surface Area and Porosimetry Analyzers (Gold APPInstruments, China, V201512) was used to measure the specific surface area, pore size and pore volume by using N_2 adsorption/desorption.

2. Preparation of nanocomposite adsorbent

In the first procedure, a 2:1 molar ratio of concentrated aqueous $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ and $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ solutions were mixed. River sand of grain size 250-355 μm was added to this mixture. 5 M NaOH solution was added drop wise to adjust the mixture until pH around 10, meanwhile the heating at 80°C under continuous vigorous magnetic stirring for 30 min. Fe(III)-Fe(II) hydroxide and then oxide formed during the reaction were deposited on the sand grain. The dark brown colored coated-sand was left for 3 h at room temperature, and then dried at 105°C for 24 h in an oven. After that the sample was repeatedly washed with deionized water in order to remove residual salts, then separated out of water by using magnetic bar, and dried at 105°C for 24 h in the oven. The result of the Fourier-transform infrared spectra (FTIR) confirmed that iron oxide (maghemite) was coated on sand. The obtaining magnetic-sand nanocomposite adsorbent was used throughout the present work as an adsorbent which the surface area was a 3.5092 $m^2\ g^{-1}$ with a pore size of 23.5334 nm and a pore volume of 0.0224 $cm^3\ g^{-1}$.

3. Determination of zero point charge of the adsorbent

The pH at point of zero charge (pH_{PZC}) of adsorbent surface was determined by using the pH drift method (Zach-Maor *et al*., 2011). A 50 mL of 0.01 M NaCl solution was adjusted pH between 2 to 12. The 0.15 g of adsorbent was added to the pH-adjusted solution and then was equilibrated for 24 h by constant shaking of 250 rpm at 25°C. The initial and the final pH of solution were measured. The pH_{PZC} is at an intersection point of plot between the curve of the initial pH and the final pH and the line of the initial pH = the final pH.

4. Batch adsorption experiments

All experiments were conducted in 50 mL Erlenmeyer flasks placed on a shaker of 250 rpm at room temperature (30±3°C). In a typical test, the adsorption consisted of 20 g L^{-1} adsorbent in 10 mg L^{-1} Cr(VI) solution. The obtained mixtures were filtered and Cr(VI) concentrations in the supernatant liquid were determined as described above. All experiments were examined in triplicate and the RSD was less than 5%. The percentage removal of Cr(VI) is calculated in Equation (1) as follows:

$$\% \text{ Cr(VI) removal} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

The adsorption capacity at time t (q_t) or the amount of Cr(VI) ions adsorbed on the surface per mass of adsorbent (mg g^{-1}) is calculated in Equation (2) as follows:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{w} \quad (2)$$

The adsorption capacity at equilibrium (q_e, mg g^{-1}) can be given in Equation (3) using expressions:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{w} \quad (3)$$

where C_0 and C_e are the initial and equilibrium concentrations (mg L^{-1}) of Cr(VI) in the solutions, respectively, V the volume of the solution (L) and W the dry mass of adsorbent (g).

RESULTS AND DISCUSSION

1. Effect of pH

In the sorption studies, pH of solution controls the sorption process. Cr(VI) speciation in aqueous solutions which exists in different forms mainly as $HCrO_4^-$, and CrO_4^{2-} is highly dependent on the pH of the solution and Cr(VI) concentration (Ajouyed *et al*., 2010). Hence, the effect of solution pH on the Cr(VI) removal and on surface properties of magnetic-sand nanocomposite adsorbent in the pH range of 2-12 were investigated as illustrated in Figure 1. It can be seen that the Cr(VI) removal was higher at lower pH and the optimum achieved at pH 3. This significant change could be explained that at pH range 2-6, $HCrO_4^-$ ions were the predominant species of Cr(VI), whereas CrO_4^{2-} ions were the predominant species of Cr(VI) in the solution at above pH 6. Since each CrO_4^{2-} ion has larger volume than $HCrO_4^-$ ion and requires two positively charged centers for the adsorption process, CrO_4^{2-} has greater hindrance to access all adsorption centers. Moreover, at higher pH range the adsorption of Cr(VI) species decreased due to the competition with OH^- for active sites on the adsorbent.

In addition, considering the point of zero charge (pH_{pzc}) as shown in Figure 2, at the pH of aqueous solution was lower than pH_{PZC} = 6 , the removal of Cr(VI) was relatively high. This is possibly due to the presence of electrostatic attraction forces between anionic Cr(VI) ions and the positively charged surface of the adsorbent. On the other hand, when the pH of aqueous solution was higher than pH_{PZC}, the removal of Cr(VI) was relatively low. This might be related to strong electrostatic repulsion between the CrO_4^{2-} anions and the negatively charged sites on the surface of the

adsorbent. Furthermore, from pH increasing during the adsorption experiments indicated that the adsorption of Cr(VI) might had occurred through the replacement of the hydroxyl group on the surface complexes of the adsorbent.

2. Effect of Contact Time

The contact time was varied from 30 min to 24 h for the adsorption of Cr(VI) by the nanocomposites. The effect of contact time on the Cr(VI) removal is shown in Figure 3. The adsorption of Cr(VI) increased with increasing the contact time, particularly at the beginning of the process the Cr(VI) adsorption rate was very rapid increasing before approaching the equilibrium. The change in the adsorption rate might be due to the fact that at the beginning all the adsorbent sites are vacant and Cr(VI) concentration gradient is very high. Later, the number of available the active sites decrease and cause the lower Cr(VI) adsorption rate. After attaining the equilibrium, the adsorption rate almost constant due to the lack of available sites. Thus, the optimum contact time for Cr(VI) adsorption was 8 h.

3. Effect of Adsorbent Dosage

The results of the Cr(VI) removal by magnetic-sand nanocomposite adsorbent at different doses were performed and are indicated in Figure 4. It can be seen that the removal percentage of Cr(VI) of the adsorbent increases rapidly with increasing in the dosage due to the greater active sites available of the adsorbent. The slightly increased Cr(VI) adsorption beyond 3 g per 25 mL of adsorbent dosage presumably might be related to the low concentration gradient of Cr(VI) in solution.

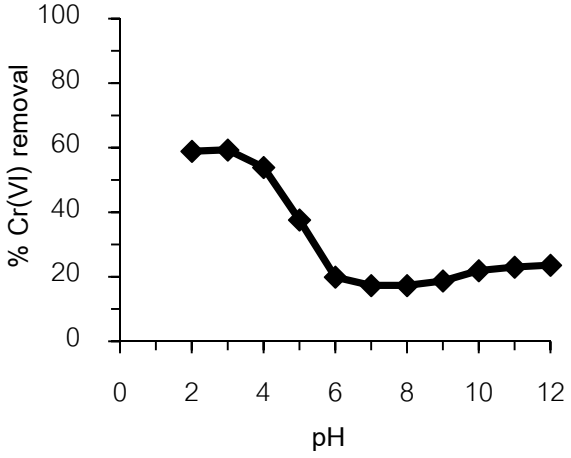


Figure 1 Effect of pH on the removal of Cr(VI).

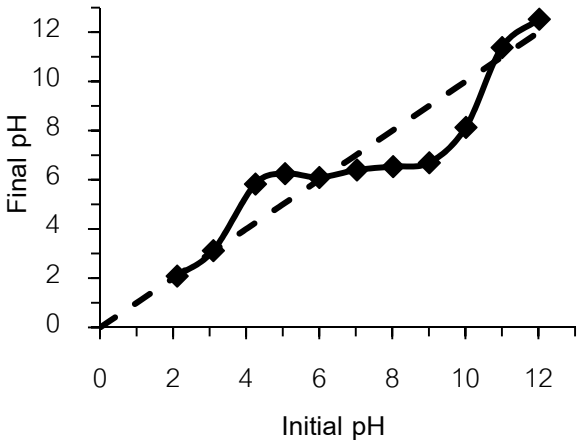


Figure 2 Point of zero charge (pH_{PZC}) determined by using the pH drift method.
The dash line represents the initial pH = final pH.

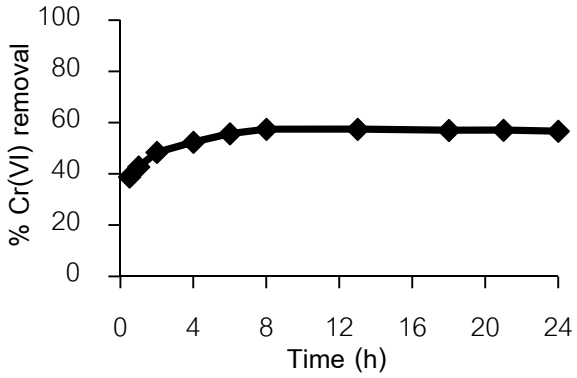


Figure 3 Effect of contact time on the removal of Cr(VI).

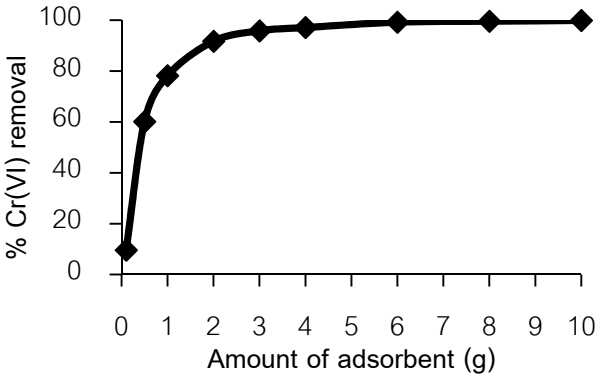


Figure 4 Effect of adsorbent dosage on the removal of Cr(VI).

.

4. Adsorption kinetics

The present adsorption process with regard to the kinetic mechanism was studied after investigating the effect of contact time on the Cr(VI) adsorption. The kinetics of adsorption was modeled by using Lagergren pseudo-first-order and Ho's pseudo-second-order to fit the kinetic data (Bhaumik *et al*., 2011; Gupta and Bhattacharyya., 2011, Ho and McKay., 2000; Saeid, 2004)

4.1 Pseudo-first-order model

The linear expression of pseudo-first-order model is defined in equation (4) as follows:

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (4)$$

where q_e (mg g^{-1}) is the equilibrium adsorption capacity, q_t (mg g^{-1}) is the adsorption capacity at time t (min), and k_1 (min^{-1}) is the rate constant of pseudo-first-order adsorption. The value of k_1 and q_e were obtained from the slope and intercept of the straight line plot between log ($q_e - q_t$) and t as illustrated in Figure 5. The results of kinetics parameters for Cr(VI) adsorption are presented in Table 1. The regression coefficient (R^2) was 0.3018, which was far from unity and theoretical value of q_e ($q_{e(cal)}$) was 0.0301, which was small as compared to experimental value of q_e. Therefore, the pseudo-first-order kinetics model was not suitable for the adsorption of Cr(VI) onto magnetic-sand nanocomposite adsorbent.

4.2 Pseudo-second-order model

The linear expression of pseudo-second-order model can be expressed in equation (5)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (5)$$

where k_2 (g mg^{-1} min^{-1}) is the rate constant of pseudo second-order adsorption. The value of q_e and k_1 were calculated from the slope and intercept of the straight line plot between t/q_t and t as shown in

Figure 6. As presented in Table 1. The regression coefficient (R^2) was 0.9981, which was close to unity and theoretical value of q_e ($q_{e(cal)}$) was 0.273, which was close to experimental value of q_e. These results indicated good fitting of adsorption data to pseudo second-order kinetics model. Most of previous studies have reported the same results (Edebali, 2016). Therefore, it can be explained that the rate limiting step is chemisorptions between the adsorbent and adsorbate (Ho, 2006), involving valence forces through sharing or exchange of electrons (Bhattacharyya and Sharma, 2005). Therefore, the mechanisms can be explained that Cr(VI) was probably adsorbed mainly onto specific adsorption sites by chemical interactions which occurred at the beginning of the process and then when the specific adsorption sites become saturated, Cr(VI) ion was adsorbed on non-specific sites with physical adsorption by electrostatic interactions (Gheju *et al*., 2016).

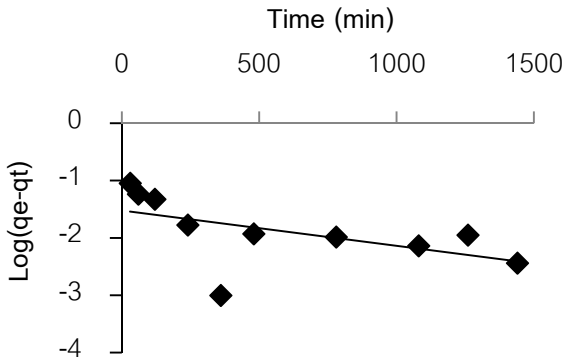


Figure 5 Pseudo-first-order kinetics model of Cr(VI) adsorption.

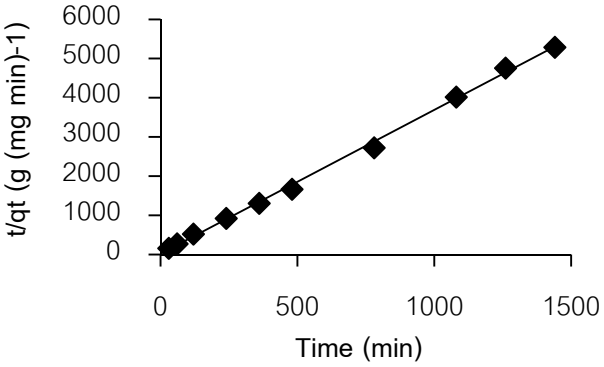


Figure 6 Pseudo-second-order kinetics model of Cr(VI) adsorption.

Table 1 Kinetic parameters of Cr(VI) removal on magnetic-sand nanocomposite adsorbent.

	Pseudo-first-order model			Pseudo-second-order model		
q_e (mg g^{-1})	$q_{e(cal)}$ (mg g^{-1})	R^2	K_1 (min^{-1})	$q_{e(cal)}$ (mg g^{-1})	R^2	K_2 (g mg^{-1} min^{-1})
0.276	0.0301	0.3018	0.0014	0.273	0.9981	0.6775

CONCLUSION

Magnetic-sand nanocomposite adsorbent was prepared for adsorptive removal of Cr(VI) ions from water. The results indicated that the adsorbent shows promising adsorption capacity for Cr(VI) removal. The rate of sorption was the most suitable with pseudo-second-order model in explaining the kinetic behavior of Cr(VI) adsorption on Magnetic-sand nanocomposite. The mechanisms of the adsorption process involved physical adsorption and chemical adsorption.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Contract no. KMUTNB-GEN-59-67.

REFERENCES

Ajouyed, O., C. Hurel, M. Ammari, L.B. Allal and N. Marmier. 2010. Sorption of Cr(VI) onto natural iron and aluminum (oxy)hydroxides: Effects of pH, ionic strength and initial concentration. **J. Hazard. Mater**. 174: 616–622.

APHA, AWWA, and WEF. 2012. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. (22nd Ed.). United Book Press, Washington DC.

Bhattacharyya, K.G., A. Sharma. 2005. Kinetics and thermodynamics of methylene blue sorption on neem (azadirachta idica) leaf powder. **Dyes Pigm**. 65: 51-59.

Bhaumik, M., A. Maity, V.V. Srinivasu and M.S. Onyango. 2011. Enhanced removal of Cr(VI) from aqueous solution using polypyrrole/Fe_3O_4 magnetic nanocomposite. **J. Hazard. Mater**. 190: 381–390.

Chaudhry, S.A., M. Ahmed, S.I.Siddiqui, S. Ahmed. 2016. Fe(II)-Sn(IV) mixed binary oxide-coated sand preparation and its use for the removal of As(III) and As(V) from water: Application of isotherm, kinetic and thermodynamics. **Journal of Molecular Liquids** 224: 431-441.

Edebali, S. 2016. Kinetics investigation of Cr(VI) removal by modified perlite with Fe_2O_3 and MnO_2 nanomaterials. **International Journal of Chemical Engineering and Application** 7:165-168.

Gheju, M., I. Balcu, G. Mosoarca. 2016. Removal of Cr(VI) from aqueous solutions by adsorption on MnO_2. **Journal of Hazardous Materials** 310: 270–277.

Gupta, S.S., K.G. Bhattacharyya. 2011. Kinetics of adsorption of metal ions on inorganic materials: a review. **Adv. Colloid Interface Sci**. 162: 39-58.

Ho, Y.S. 2006. Review of second-order models for adsorption systems. **J.Hazard.Mater**. B136: 681-689.

Ho, Y. S. and G. McKay. 2000. The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. **Water Reserve** 34: 735-742.

Kan, C., A.H. Ibe, K.P. Rivera, R.O Arazo and M.D. Luna. 2017. Hexavalent chromium removal from aqueous solution by adsorbent synthesized from groundwater treatment residuals. **Sustainable Environment Research** 27: 163-171.

Owalude, S.O. and A.C. Tella. 2016. Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions by adsorption on modified groundnut hull. **Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences** 5: 377-388.

Saeid, A. 2004. Kinetic models of sorption: A theoretical analysis. **J. Colloid Interf. Sci**. 276: 47–52.

Zach-Maor, R. Semiat and H. Shemer. 2011. Synthesis, performance, and modeling of immobilized nano-sized magnetite layer for phosphate removal. **J.Colloid Interf. Sci**. 357: 440-446.

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร

Assessment of Greenhouse Gas Emission from Bangkok Metropolitan Administration's Wastewater Treatment Plants

ญาณิศา ส่องประทีป[1] และ **ชลอ จารุสุทธิรักษ์**[1*]

Yanisa Songpratheep[1] and Chalor Jarusutthirak[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสีย 7 แห่ง ของกรุงเทพมหานคร ได้แก่ โรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ สี่พระยา ช่องนนทรี จตุจักร ดินแดง หนองแขม และทุ่งครุ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมจากระบบบำบัดน้ำเสียระหว่างปี พ.ศ. 2554 - 2558 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 75,227 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี หรือ 2.03 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อพิจารณาแหล่งปล่อยโดยตรงจากระบบ พบว่า ในปี 2558 มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดงเท่ากับ 215,926 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี หรือ 2.69 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 41 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานครทั้งหมด เมื่อพิจารณาแหล่งปล่อยทางอ้อมจากระบบ พบว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดจากโรงควบคุมคุณภาพดินแดงมีเท่ากับ 11,384 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี

ABSTRACT

In this study, greenhouse gas (GHG) emissions from wastewater treatment plants (WWTPs) of Bangkok Metropolitan Administration (BMA), consisting of Rattanakosin, Si Phraya, Chong Nonsi, Chatuchak, Din Daeng, Nongkhaem, and Thungkru WWTPs, were calculated. It was found that total greenhouse gas emissions from BMA's wastewater treatment plants during 2011 - 2015 (2554-2558 A.D.) were estimated in an average of 75,227 tons carbon dioxide equivalents (CO_2e) per year, corresponding to 2.03 $kgCO_2e/m^3$. Among these years, the highest GHG emission of 215,926 tCO_2e was found from Din Daeng WWTPs in 2015, corresponding to 2.69 $kgCO_2e/m^3$. This amount of GHG emission accounted for 41% of total emissions from BMA's WWTPs. According to off-site emission, electricity consumption was found to be the main source of indirect GHG emission. The highest off-site GHG emission of 11,384 tCO_2e was released from Din Daeng WWTPs.

Key Words: assessment, emission, greenhouse gases, wastewater treatment plant

*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

ปัจจุบันปัญหาภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ได้ทวีความรุนแรงและส่งผลกระทบเป็นวงกว้างมากขึ้นทั่วโลก ส่วนหนึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีด้วยกันหลากหลายด้าน ทั้งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบรรยากาศของโลก ความชื้นในอากาศ ความแห้งแล้ง อุทกภัย สุขภาพอนามัย ความหลากหลายทางชีวภาพ เป็นต้น ระบบบำบัดน้ำเสียถูกระบุว่าเป็นหนึ่งในแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งทำให้เกิดก๊าซ CO_2 CH_4 และ N_2O โดยสามารถจำแนกแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียเป็นแหล่งจากภายในระบบ (On-site) โดยตรง (Direct greenhouse gas emission) ได้แก่ กระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ (Aerobic) เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic) เกิดก๊าซมีเทน (Cakir and Stenstrom, 2005; Sahely *et al*., 2006) รวมทั้งกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification) ที่มีโอกาสปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เป็นสารมัธยันต์ (Intermediate product) (IPCC, 2007) ส่วนแหล่งจากภายนอกระบบ (Off-site) เกิดจากกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (Indirect greenhouse gas emission) ได้แก่ การใช้พลังงานไฟฟ้า น้ำประปาและสารเคมี (Kyung *et al.,* 2015)

ปัจจุบันกรุงเทพมหานครรับผิดชอบดูแลโรงควบคุมคุณภาพน้ำ 7 แห่ง สามารถรับน้ำเสียชุมชนรวมทั้งสิ้น 992,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ระบบบำบัดน้ำเสียแต่ละชนิดมีกระบวนการทำงานและการเดินระบบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge Process, AS) ระบบบำบัดน้ำเสียรวมแบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor, SBR) บำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการใช้อากาศ (Aerobic) เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก ระบบบำบัดน้ำเสียรวมแบบกำจัดธาตุอาหารไนโตรเจนทางชีวภาพ (Biological Activated Sludge with Nutrient Removal, BNR) เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเปลี่ยนสารประกอบแอมโมเนียมเป็นสารประกอบไนไตรท์และไนเตรทภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic Condition) ต่อมาสารประกอบไนเตรทถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันภายใต้สภาวะแอน็อกซิก (Anoxic Condition) ในระหว่างกระบวนการดังกล่าวมีโอกาสพบสารมัธยันต์ (Intermediate product) ได้แก่ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวการที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (IPCC, 2007) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการรายงานข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำดังกล่าว

งานวิจัยนี้จึงทำการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานครทั้งทางตรงและจากกิจกรรมทางอ้อม โดยใช้สมการแบบจำลองและค่าสัมประสิทธิ์การปล่อย (Emission factors, EF) ที่พัฒนาขึ้นโดย Kyung *et al.* (2015); Bao *et al*. (2016) ซึ่งเป็นการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงทั้งจากการย่อยสลายสารอินทรีย์และการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารไนโตรเจน รวมทั้งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้ไฟฟ้า น้ำประปาและสารเคมี ข้อมูลกิจกรรมที่ใช้เป็นข้อมูลทุติยภูมิที่รวบรวมย้อนหลัง 5 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 ถึง 2558 ผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียทำให้ทราบสถานะของระบบบำบัดน้ำเสียในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการเพื่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียได้ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษาและการรวบรวมข้อมูลกิจกรรม

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร 7 แห่ง ได้แก่ โรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ สี่พระยา ช่องนนทรี จตุจักร ดินแดง หนองแขม และ ทุ่งครุ โดยทำการรวบรวมข้อมูลกิจกรรมด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ อัตราการไหลของระบบบำบัดน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน) ปริมาณความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD) ก่อนและหลังบำบัด (มก./ล.) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ก่อนและหลังบำบัด (มก./ล.) (Table 1) ส่วนข้อมูลกิจกรรมด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ปริมาณการใช้ไฟฟ้า สารเคมี และน้ำประปา

Table 1 Detailed information of BMA's wastewater treatment plants

WWTPs	Type	Capacity (m^3/day)	Average BOD (mg/L)		Average TN (mg/L)	
			Influent	Effluent	Influent	Effluent
Rattanakosin	Contact Stabilization AS	30,000	59.51	8.98	7.35	5.15
Si Phraya	Two-Stage AS	40,000	52.24	5.12	12.18	9.03
Chong Nonsi	Cyclic AS	200,000	32.65	5.43	11.19	7.87
Chatuchak	Cyclic AS	150,000	32.59	4.42	14.85	7.90
Din Daeng	AS with Nutrient Removal	350,000	37.79	4.97	16.29	7.67
Nongkhaem	AS with Verticle Loop Reactor	157,000	39.46	6.41	10.85	5.31
Thungkru	AS with Verticle Loop Reactor	65,000	27.71	4.31	10.15	5.88

การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสีย

1) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรง

ค่าปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงทั้งหมดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$P_{onsite} = \sum[(E_{CO2} + (E_{CH4} \times GWP_{CH4}) + (E_{N2O} \times GWP_{N2O})] \quad (1)$$

โดยที่ $E_{CO2} = EF_{CO2} \times M_{BOD}$; $E_{CH4} = EF_{CH4} \times M_{BOD}$; $E_{N2O} = EF_{N2O} \times M_{TN}$

$M_{BOD} = (\Delta BOD \times Q) \times 10^{-3}$; $M_{TN} = (\Delta TN \times Q) \times 10^{-3}$

และ GWP คือ ค่าศักยภาพในการเกิดภาวะโลกร้อน ($kgCO_2e/kg$), ECO_2 คือปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kg/d), E_{CH4} คือปริมาณก๊าซมีเทน (kg/d), E_{N2O} คือปริมาณก๊าซไนตรัสออกไซด์ (kg/d) , Q คืออัตราการไหล (m^3/d), ΔBOD คือค่าบีโอดีที่ลดลง (mg/L), ΔTN คือค่าไนโตรเจนทั้งหมดที่ลดลง (mg/L) M_{BOD} คือปริมาตรของบีโอดี (kgBOD), และ M_{TN} คือปริมาตรของไนโตรเจนทั้งหมด (kgTN)

ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor, EF) สำหรับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงที่ใช้ในการคำนวณ แนะนำโดย Kyung et al. (2015) ดังนี้ EF_{CO2} = 23.61 $kgCO_2e/kg$ BOD, EF_{CH4} = 0.146 $kgCO_2e/kg$ BOD, และ EF_{N2O} = 0.653 $kgCO_2e/kg$ TN (Bao *et al*., 2016; Kyung *et al*., 2015)

2) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม

ค่าปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้า น้ำประปาและสารเคมี สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2-4 ตามลำดับ ดังนี้

$$P_{offsite,electricity} = \sum(EF_{electricity} \times E_{unit\ process}) \quad (2)$$

$$P_{offsite,water} = \sum(EF_{water} \times W_{unit\ process}) \quad (3)$$

$$P_{offsite,chemical} = \sum(EF_{chemical} \times M_{unit\ process}) \quad (4)$$

โดยที่ $EF_{electricity}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้าสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 0.6093 $kgCO_2e/kWh$, $E_{unit\ process}$ คือปริมาณการใช้ไฟฟ้า (kWh), EF_{water} คือค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้น้ำประปา มีค่าเท่ากับ 0.5081 $kgCO_2e/m^3$, $W_{unit\ process}$ คือปริมาณการใช้น้ำประปาสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (m^3), $EF_{chemical}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้สารเคมีมีค่าเท่ากับ 2.2 $kgCO_2e/kg$ และ $M_{unit\ process}$ คือปริมาณการใช้สารเคมี (kg/m^3) (Kyung *et al.*, 2015)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

อัตราการไหลและลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

จากค่าเฉลี่ยอัตราการไหลและสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัดและหลังบำบัดของโรงควบคุมคุณภาพน้ำกรุงเทพมหานคร ระหว่างปี พ.ศ. 2554 - 2558 พบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดงมีน้ำเสียเข้าระบบสูงสุด มีค่าเฉลี่ยอัตราการไหลของน้ำเสียเท่ากับ 204,414 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในขณะที่โรงควบคุมคุณภาพน้ำสี่พระยามีค่าอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบต่ำกว่าที่อื่น โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15,275 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ค่า BOD และ TN ของน้ำเสียก่อนบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 40 และ 11 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Figure 1)

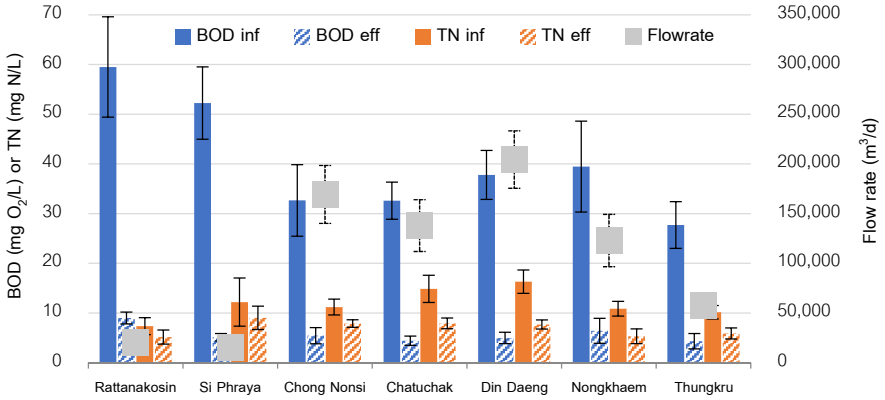


Figure 1 Flowrate and characteristics of wastewaters from BMA's wastewater treatment plants

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรง (On-site emission)

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากระบบบำบัดน้ำเสีย ใช้ค่า BOD และ TN ที่ระบบบำบัดน้ำเสียกำจัดได้และอัตราการไหลของระบบบำบัดน้ำเสียในการคำนวณ (Figure 2) พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดงมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปีตั้งแต่ปี 2554-2558 เนื่องจากระบบมีขนาดใหญ่สามารถรับน้ำเสียได้สูงสุดถึง 350,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทำให้มีอัตราภาระสารอินทรีย์และไนโตรเจนในรูปของ BOD และ TN เข้าสู่ระบบมาก ส่งผลให้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการบำบัดของโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดงสูงกว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำแห่งอื่น

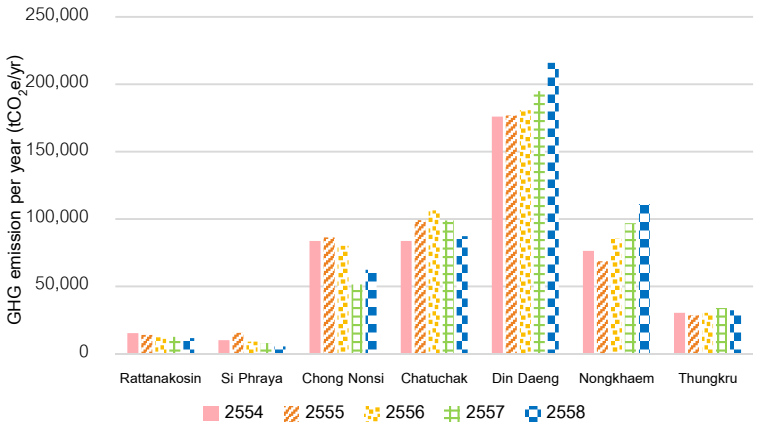


Figure 2 Direct greenhouse gas emission from wastewater treatment plants in 2554-2558 (2011-2015)

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำแต่ละแห่งขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลเข้าสู่ระบบบำบัด ประเภทของระบบ และความสามารถในการบำบัด BOD และ TN ระหว่างการบำบัดน้ำเสีย สารอินทรีย์ในระบบถูกย่อยสลายและเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซ CO_2 โดยจุลินทรีย์แบบใช้อากาศ (Aerobic bacteria) ก๊าซ CH_4 มีโอกาสเกิดขึ้นได้เล็กน้อยจากสภาวะไร้อากาศในบางจุดของระบบเติมอากาศ ส่วนก๊าซ N_2O เป็นสารมัธยันต์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน (IPCC, 2007) Figure 3 แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำของกรุงเทพมหานครในปี พ.ศ. 2558 จำแนกตามประเภทของก๊าซเรือนกระจก พบว่าก๊าซ N_2O มีส่วนสำคัญต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสีย แม้ว่าก๊าซ N_2O ที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่มากก็ตาม แต่ศักยภาพการเกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซ N_2O มีค่าเป็น 298 เท่าของก๊าซ CO_2

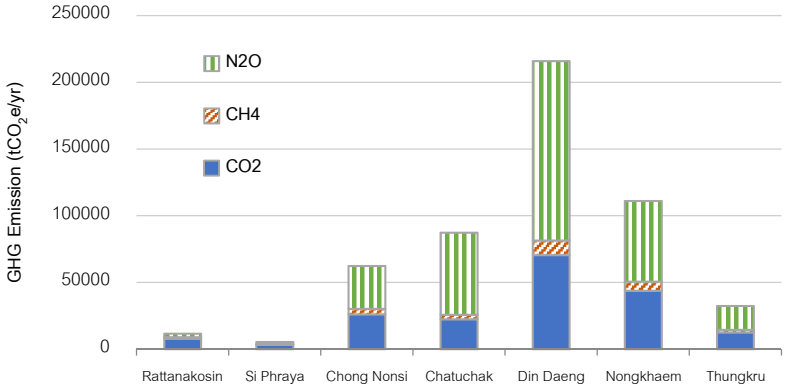


Figure 3 Direct greenhouse gas emission from wastewater treatment plants in 2558 (2015)

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (Off-site emission)

กิจกรรม ของระบบบำบัดน้ำเสียด้านอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม ได้แก่ การใช้ไฟฟ้า การใช้น้ำประปาและการใช้สารเคมี ผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมดังกล่าวพบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากกิจกรรมการใช้ไฟฟ้า (Figure 4) มีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้น้ำประปา (Figure 5) และการใช้สารเคมี (Figure 6) เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานครเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ มีการใช้พลังงานสำหรับการเติมอากาศระหว่างการเดินระบบ ซึ่งพบว่าโรงควบคุม

คุณภาพน้ำดินแดงมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้ไฟฟ้าสูงกว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำแห่งอื่น เนื่องจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดงรับภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดสูงสุดจึงต้องใช้พลังงานในการเติมอากาศมากกว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำแห่งอื่น ส่งผลทำให้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้ไฟฟ้าสูงที่สุด สำหรับปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้น้ำประปาและสารเคมี มีค่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อเทียบกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้า

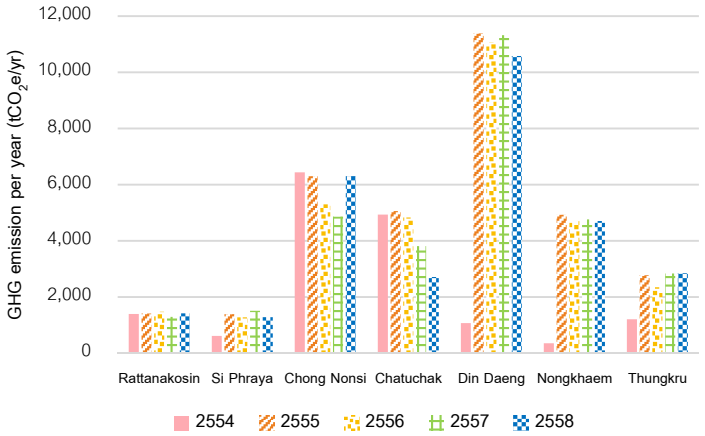


Figure 4 Indirect greenhouse gas emission from electricity consumption

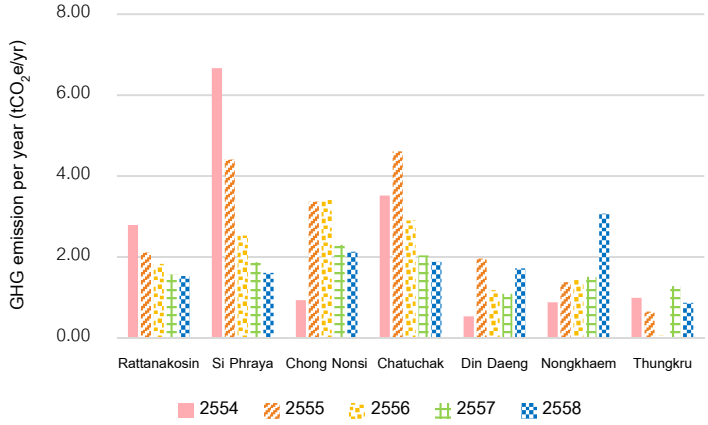


Figure 5 Indirect greenhouse gas emission from water consumption

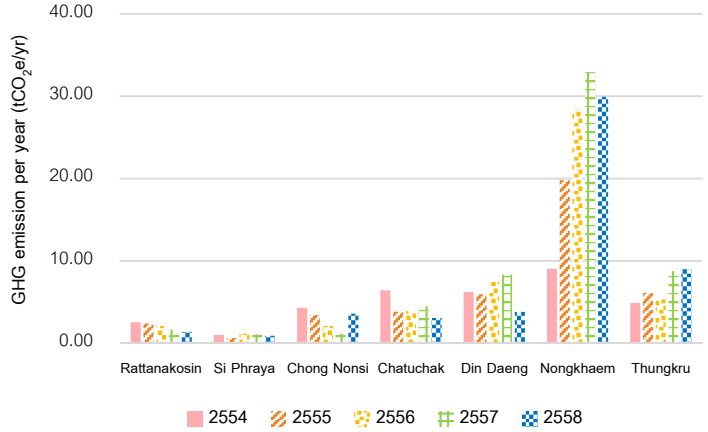


Figure 6 Indirect greenhouse gas emission from chemical use

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยปริมาตรน้ำเสีย

1) ค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยปริมาตร จำแนกตามโรงควบคุมคุณภาพน้ำ

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำมากกว่าร้อยละ 88 เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบโดยตรง (Figure 7) เมื่อพิจารณาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำเสียจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำต่าง ๆ พบว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยปริมาตรน้ำเสียเฉลี่ยแยกตามโรงควบคุมคุณภาพน้ำมีค่าตั้งแต่ 1.50 ถึง 2.69 $kgCO_2e/m^3$ โดยโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดงมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยปริมาตรน้ำเสียสูงสุด และโรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรีมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยปริมาตรน้ำเสียต่ำสุด

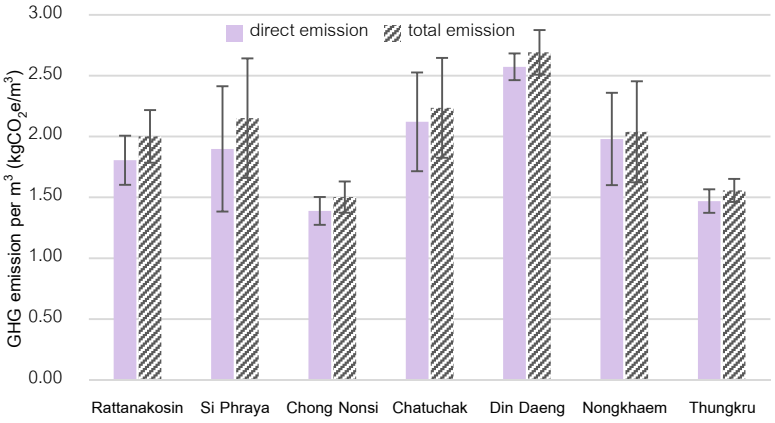


Figure 7 Greenhouse gas emission per volume of wastewater from wastewater treatment plants

2) ค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยปริมาตร จำแนกรายปี

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยปริมาตรจากการปล่อยโดยตรงจากระบบและจากการปล่อยรวมทั้งหมดในปี พ.ศ. 2554 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.73 และ 1.79 $kgCO_2e/m^3$ ตามลำดับ (Figure 8) และมีแนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2558 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.98 และ 2.14 $kgCO_2e/m^3$ ตามลำดับ เมื่อคิดค่าเฉลี่ยจากทุกโรงควบคุมคุณภาพน้ำ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 ถึง พ.ศ. 2558 ได้ค่าเฉลี่ยของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร เท่ากับ 2.03 $kgCO_2e/m^3$

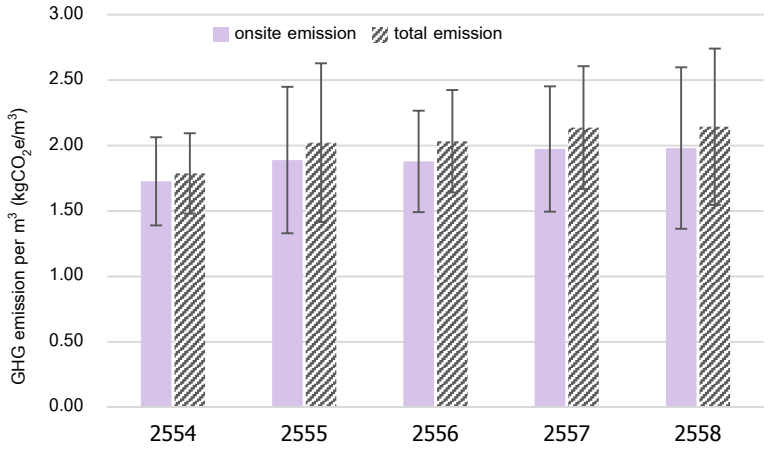


Figure 8 Average greenhouse gas emission per volume of wastewater during 2554-2558 (2011-2015)

สรุป

1. ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ ค่า BOD และ TN loading ซึ่งพบว่าโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดงให้ค่าปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุดเมื่อเทียบกับโรงควบคุมคุณภาพทั้ง 7 แห่ง โดยมีค่าเท่ากับ 2.69 $kgCO_2e/m^3$ ทั้งนี้ก๊าซ N_2O มีส่วนสำคัญต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสีย

2. ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำมากกว่าร้อยละ 88 เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบโดยตรง ส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมทางอ้อม พบว่า กิจกรรมการใช้ไฟฟ้า จากการเติมอากาศ ส่งผลให้เกิดก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดเมื่อเทียบกับกิจกรรมการใช้น้ำประปาและสารเคมี

3. ค่าเฉลี่ยของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตรของน้ำเสีย ประเมินจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำทุกแห่ง ในช่วงปี พ.ศ. 2554-2558 มีค่าเท่ากับ 2.03 $kgCO_2e/m^3$

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยและสำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสีย

เอกสารอ้างอิง

Bao, Z., D. Sun and S. Sun. 2016. Assessment of greenhouse gas emission from A/O and SBR wastewater treatment plants in Beijing, China. **International Biodeterioration & Biodegradation** 108: 108-114.

Cakir, F.Y., and M.K. Stenstrom, 2005. Greenhouse gas production: a comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology. **Water Research** 39: 4197–4203.

IPCC, 2007. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Ch. 6 -Wastewater Treatment and Discharge**. IGES, Japan.

Kyung, D., M. Kim, J. Chang and W. Lee. 2015. Estimation of greenhouse gas emissions from a hybrid wastewater treatment plant. **Journal of Cleaner Production** 95: 117-123.

Sahely, H.R., H.L., MacLean, H.D., Monteith, and D.M. Bagley. 2006. Comparison of onsite and upstream greenhouse gas emissions from Canadian municipal wastewater treatment facilities. **Journal of Environmental Engineering & Science** 5: 405–415.

การบำบัดน้ำมันและไขมันในน้ำเสียจากร้านสะดวกซื้อด้วยถังดักไขมันเสริมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ

Removal of Oil and Grease from Convenience Store Wastewater Using Grease Trap with Natural Sorbents

รตีวรรณ สุวัฒนมาลา[1*] กาญจนาภรณ์ อัครวงษ์[1] ช่อสุดา สูงทรัพย์ไพศาล[1] ฐิติกานต์ บุญต่อ[1] และ เอมอร ประจวบมอญ[1]

Ratiwun Suwattanamala[1*], Kanchanabhorn Akarawong[1], Chosuda Soongsappaisal[1], Thitikarn Boontor[1] and Aimorn Prachuabmorn[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยถังดักไขมันเสริมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ การศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ แบ่งเป็น 2 ชุด ตามชนิดของวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ ได้แก่ ใบสนทะเล และถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง ระยะเวลากักพักในถังดักไขมันและถังเสริมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติกำหนดไว้ถังละ 30 นาที น้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบเป็นน้ำเสียจริงจากร้านสะดวกซื้อ มีลักษณะขาวขุ่น อุณหภูมิ องศาเซลเซียส 29 พีเอชประมาณ 5 น้ำมันและไขมันอยู่ในช่วง 135-198 มก./ล. ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมันของถังดักไขมันเสริมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด พบว่าใบสนทะเล และถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง มีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ย 67.76 $\pm$0.69 % และ 65.42 $\pm$ 6.70% ตามลำดับ

ABSTRACT

The objective was to study the efficiency of oil and grease removal from wastewater using grease trap with natural sorbents. The lab- scale experiment was performed at 2 types of natural sorbents namely *Casuarina equisetifolia* needle and coconut charcoal briquettes. Hydraulic retention time in each tank of grease trap tank and additional tank was set at 30 minutes. Wastewater was collected from a convenience store. White emulsified oil suspended in the wastewater samples. The water had a temperature about 29 degrees Celsius, a pH-level of 5, and initial oil and grease concentration in the wastewater of 135-198 mg/l.The results showed that efficiency of oil and grease removal using grease traps with natural sorbents, which be *Casuarina equisetifolia* needle and coconut charcoal briquettes, were 67.76 + 0.69 and 65.42 + 6.70 %,respectively.

Key Words: wastewater, oil and grease, grease trap, natural sorbents

*Corresponding author; e-mail address: ratiwun@buu.ac.th

[1]ภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

[1]Department of Environmental Health, Faculty of Public Health,Burapha University, Chonburi 20131

คำนำ

น้ำมันและไขมันในน้ำเสียเมื่อปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ อาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ น้ำมันและไขมันที่อยู่ในรูปฟิล์มน้ำมันจะลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ ทำให้ออกซิเจนในอากาศไม่สามารถละลายลงไปในน้ำได้ บดบังแสงแดดเป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายหรือพืชที่อยู่ใต้น้ำ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในน้ำ (สนอง,2550) นอกจากนี้น้ำมันและไขมันในน้ำเสียยังเกิดผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำเสีย เช่น เกิดการจับตัวเป็นก้อนและอุดตันในท่อระบายน้ำโดยเฉพาะในท่อคอนกรีต (Mundo and Sutheerawattananonda, 2017; He *et al*., 2013) น้ำมันและไขมันในน้ำเสียยังรบกวนการทำงานของระบบบัดน้ำเสียทุกชนิด (บุญส่ง และคณะ, 2554) การบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยถังดักไขมันเป็นวิธีการบำบัดเบื้องต้นที่ใช้กันทั่วไป ต้องออกแบบให้ถังมีความจุเพียงพอที่จะกักเก็บน้ำไว้ระยะหนึ่ง เพื่อให้ให้น้ำมันและไขมันแยกตัวจากน้ำเสียและลอยสู่ผิวน้ำเพื่อรอการกวาดหรือตักออกไปกำจัด (บุญส่ง และคณะ, 2554; Chu and Ng, 2000) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 นาที- 6 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่มีน้ำเสียเกิดขึ้นปริมาณมาก อาจทำให้ระยะเวลากักพักในถังดักไขมันสั้นลง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ดี มักพบปัญหาคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านถังดักไขมันแล้ว ส่วนใหญ่มีค่าน้ำมันและไขมันสูงเกินจากมาตรฐานกำหนด (Luangrungkiat, 2002) สำหรับมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด ประเภท ก - ง ตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 20 มก./ล. ส่วนอาคารประเภท จ กำหนดให้มีค่าน้ำมันแลไขมันไม่เกิน 100 มก./ล.(กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2548) ร้านสะดวกซื้อเป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่กระจายตัวอยู่ตามอาคารต่าง ๆ ในเขตชุมชน น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีน้ำมันและไขมันปนเปื้อนอยู่ซึ่งมาจากกิจกรรมการจัดเตรียมสินค้าประเภทอาหารพร้อมรับประทาน สินค้าอาหารในกลุ่มนี้มักมีส่วนประกอบของน้ำมันและไขมันสูง เช่น ไส้กรอก ครีม ชีส เนย เป็นต้น มีการล้างภาชนะและอุปกรณ์ด้วยน้ำยาล้างจานซึ่งมีสารลดแรงตึงผิว ทำให้น้ำมันและไขมันบางส่วนในน้ำเสียกลายเป็นอิมัลชัน จึงแยกออกจากน้ำด้วยการทำให้ลอยหรือการแยกตามแรงโน้มถ่วงได้ยาก แต่สามารถกำจัดได้โดยการเติมสารเคมี เช่น สารส้ม เฟอริคคลอไรด์ วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและเกิดกากตะกอนที่ต้องนำไปกำจัด (Pintor *et al*., 2016) จึงไม่สะดวกต่อการใช้งานในแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่มีขนาดเล็ก วิธีการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถกำจัดน้ำมันและไขมันได้ดี (Pintor *et al*., 2016) วัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับมีด้วยกันหลายชนิด ทั้งชนิดที่ทำมาจากวัสดุสังเคราะห์และวัสดุจากธรรมชาติ ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งและใบสนทะเลเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น มีพื้นที่ผิวมาก พื้นผิวมีรูพรุน หรือรอยหยักนูน และไม่ละลายน้ำหรือเปื่อยยุ่ยง่าย สามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับสารมลพิษต่าง ๆ เช่น
สีย้อม โลหะหนัก (Dahri *et al*., 2015) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับน้ำมันและไขมัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยถังดักไขมันเสริมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ โดยนำถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งซึ่งหาได้ทั่วไปในท้องตลาด และใบสนทะเลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติที่พบได้ทั่วไปในท้องถิ่น มาใช้เป็นวัสดุดูดซับ

อุปกรณ์และวิธีการ

น้ำเสียที่ใช้ทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงของร้านสะดวกซื้อแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี มาจากการล้างภาชนะและอุปกรณ์จัดเตรียมสินค้ากลุ่มอาหารเพื่อบริการให้ลูกค้า ซึ่งสินค้าดังกล่าวส่วนมากมีส่วนผสมของ

น้ำมันและไขมันจึงทำให้น้ำเสียมีปริมาณน้ำมันและไขมันปนเปื้อนอยู่ ทำการเก็บตัวอย่างจากบ่อรวมน้ำเสียก่อนเข้าสู่ถังดักไขมัน น้ำมันและไขมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเป็นน้ำมันและไขมันที่มาจากพืชและสัตว์ เมื่อมองด้วยตาเปล่าน้ำมีลักษณะขาวขุ่น อุณหภูมิ องศาเซลเซียส 29 พีเอชประมาณ 5 น้ำมันและไขมันอยู่ในช่วง 135-198 มก./ล.

วัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับ

ก. ใบสนทะเล

ใบสนทะเล (*Casuarima equisetifolia*) ที่ร่วงตามธรรมชาติ นำมาตัดให้มีความยาวประมาณ 7 ซม. ล้างน้ำสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกนำไปผึ่งแดดจนแห้ง ก่อนอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้น เก็บในภาชนะปิดสนิทเตรียมไว้ใช้งานต่อไป

ข. ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง

ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งที่จำหน่ายในท้องตลาดสั่งซื้อทางออนไลน์ นำมาตัดเป็นท่อนสั้น ๆ ให้มีความยาวประมาณ 1.5 นิ้ว ถ่านมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร มีรูกลวงตรงกลาง ขนาด 0.8 เซนติเมตร นำมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น เก็บในภาชนะปิดสนิท เพื่อไว้ใช้งานต่อไป

ระบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

เป็นระบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการ เดินระบบแบบทีละเท (Batch test) ประกอบด้วย

ก. ถังดักไขมันจำลอง ความจุ 6 ลิตร มีตะแกรงดักเศษอาหารวางตรงจุดรับน้ำเข้า กำหนดระยะเวลากักพัก 30 นาที

ข. ถังเสริมไม่บรรจุวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ เป็นถังพลาสติกจำลอง มีความจุ 1.3 ลิตร ลักษณะเช่นเดียวกับถังในข้อ ค. รับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยถังดักไขมันจำลอง (ก.) มาแล้วโดยป้อนจากด้านล่างของถังดูดซับวัสดุจากธรรมชาติ และ ไหลล้นออกด้านบนถัง กำหนดระยะเวลากักพัก 30 นาที

ค. ถังวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ เป็นถังพลาสติกจำลองมีความจุ 1.3 ลิตร เป็นถังใส่วัสดุดูดซับที่นำมาเสริมต่อจากถังดักไขมันจำลอง (ก.) ภายในบรรจุวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ จัดเรียงวัสดุดูดซับที่เตรียมไว้ลงไปในถังให้มีปริมาณ 50 % ของความจุถัง พยายามให้เกิดช่องว่าง (Void) น้อยที่สุด แต่ไม่อัดแน่นจนเกินไป รับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยถังดักไขมันจำลอง (ก.) มาแล้ว โดยป้อนจากด้านล่างของถังดูดซับวัสดุธรรมชาติ และ ไหลล้นออกด้านบนถัง กำหนดระยะเวลากักพัก 30 นาที

การทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมัน

การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ แบ่งเป็น 2 ชุด ได้แก่

1. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยถังดักไขมันเสริมวัสดุดูดซับใบสนทะเล
   1.1 การบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยถังดักไขมัน และเสริมถังไม่มีวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ
   1.2 การบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยถังดักไขมันและเสริมถังวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ; ใบสนทะเล
2. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยถังดักไขมันเสริมวัสดุดูดซับถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง

2.1 การบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยถังดักไขมันและเสริมถัง ไม่มีวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ

2.2 การบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยถังดักไขมันและเสริมถังวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ;ถ่านกะลามะพร้าว อัดแท่ง

ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ คำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมัน ตามสมการที่ (1)

$$\% \text{ Removal} = \frac{C_0 \quad C_e}{C_e} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ C_0 เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันก่อนการบำบัด (mg/L)

C_e เป็นความเข้มข้นที่เหลือของน้ำมันและไขมันหลังการบำบัด (mg/L)

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ตรวจหาค่าพีเอชด้วยกระดาษวัดพีเอช วิเคราะห์น้ำมันและไขมันด้วยวิธี partition gravimetric ตามวิธีมาตรฐานใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) APHA, 2005) นำวัสดุดูดซับจากธรรมชาติที่เตรียมไว้ไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด (Scanning Electron Microscope :SEM) บริษัท LEO รุ่น 1450 VP

ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมันในน้ำเสีย พบว่า ผลการทดลองชุดที่ 1.1 และ 1.2 น้ำเสียก่อนเข้าระบบมีน้ำมันและไขมัน 197 $\pm$ 0.5 มก./ล. ภายหลังการบำบัดด้วยถังดักไขมันและถังเสริมไม่มีการบรรจุวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ มีน้ำมันและไขมันคงเหลือ 77.00 $\pm$ 1.00 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 61.01$\pm$ 0.41 % เมื่อทำการบำบัดโดยใช้ถังดักไขมันร่วมกับถังเสริมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติชนิดใบสนทะเล พบว่า มีน้ำมันและไขมันคงเหลือ 63.67 $\pm$ 1.53 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 67.76 $\pm$ 0.69 % สำหรับผลการทดลองชุดที่ 2.1 และ 2.2 พบว่าน้ำเสียก่อนเข้าระบบมีน้ำมันและไขมัน 136 $\pm$ 1.0 มก./ล. ภายหลังการบำบัดด้วยถังดักไขมันและถังเสริมไม่มีการบรรจุวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ มีน้ำมันและไขมันคงเหลือ 66.33 $\pm$ 4.73 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 51.21 $\pm$ 3.73 % เมื่อใช้ถังดักไขมันร่วมกับถังเสริมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ ชนิดถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง พบว่า มีน้ำมันและไขมันคงเหลือ 47.00 $\pm$ 8.89 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 65.42 $\pm$ 6.70 % ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดทั้ง 2 ชุดการทดลอง พบว่า การบำบัดน้ำมันและไขมันโดยใช้ถังดักไขมันร่วมกับถังเสริมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ถังดักไขมันเพียงอย่างเดียว ($p < 0.05$) ดังแสดงใน Table 1 โดยทั่วไปถังดักไขมัน ควรมีระบบเวลากักพักไม่น้อยกว่า 20 นาที อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของถังดักไขมันจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีระยะเวลากักพักต่ำกว่า 30 นาที (Chu and Ng, 2000) ในการทดลองครั้งนี้กำหนดระยะเวลากักพักในถังดักไขมันนาน 30 นาที ทำให้น้ำมันและไขมันแยกตัวและลอยสู่ผิวน้ำ สามารถแยกออกจากน้ำเสียได้แต่ประสิทธิภาพการบำบัดไม่สูงนักสาเหตุหนึ่งมาจากในการล้างภาชนะ มีการใช้น้ำยาล้างจานซึ่งมีส่วนประกอบของสารลดแรงตึงผิว ทำให้น้ำมันและไขมันบางส่วนอยู่ในรูปอิมัลชัน (emulsion) ดังจะเห็นได้จากน้ำเสียมีสีขาวขุ่นคล้ายนม น้ำมันและไขมันในรูป

อิมัลชันจะมีขนาดอนุภาคเล็กคล้ายคอลลอยด์ (มั่นสิน และ มั่นรักษ์, 2547) แขวนลอยอยู่ในน้ำ มีความคงตัวสูง และไม่ลอยสู่ผิวน้ำ ทำให้การบำบัดด้วยถังดักไขมัน ซึ่งอาศัยหลักการทำให้ลอยตามธรรมชาติ (flotation) ไม่ได้ผล ในการกำจัดน้ำมันและไขมันในรูปอิมัลชันที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีดูดซับ (Pinto *et al*., 2016) ผลการศึกษาครั้งนี้ เมื่อนำวัสดุดูดซับธรรมชาติ ได้แก่ ใบสนทะเล และ ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง มาร่วมบำบัด พบว่า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดโดยมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากการไม่ใช้วัสดุดูดซับ 6.75 $\pm$ 0.31 % และ14.21 $\pm$ 2.97 % ตามลำดับ น้ำมันและไขมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นน้ำมันและไขมันจากพืชและสัตว์ซึ่งประกอบด้วยไตรกลีเซอร์ไรด์ อิมัลชันที่เกิดจากไตรกลีเซอร์ไรด์จะมีความคงตัวน้อยกว่าอิมัลชันของน้ำมันไฮโดรคาร์บอน (Srinivasan and Viraraghavan, 2010) อีกทั้งน้ำเสียยังมีฤทธิ์ค่อนข้างเป็นกรด (พีเอชประมาณ 5) ซึ่งเอื้อให้น้ำมันและไขมันในรูปอิมัลชัน มีสภาพไม่คงตัว (destabilization) และเกิดการรวมตัวเป็นเม็ดน้ำมันขนาดใหญ่ ทำให้น้ำมันและไขมันถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับได้ง่าย (Wahi *et al*., 2017; Pinto *et al*., 2016; Srinivasan and Viraraghavan, 2010)

Table1 Results of oil and grease removal efficiency

Set	Experiment	Influent FOG (mg/l)	Effluent FOG (mg/l)	% FOG removal	t	p -value
1	1.1 Grease trap tanks with additional tank	197+0.5	77.00 $\pm$ 1.00	61.01 $\pm$ 0.41	-14.531	0.000
	1.2 Grease trap with additional tank containing sorbent; *Casuarina equisetifolia*		63.67 $\pm$ 1.53	67.76 $\pm$ 0.69		
2	2.1 Grease trap tank with additional tank	136 + 1.0	66.33 $\pm$ 4.73	51.21 $\pm$ 3.73	-3.21	0.046
	2.2 Grease trap with additional tank containing sorbent; Coconut charcoal briquettes		47.00 $\pm$ 8.89	65.42 $\pm$ 6.70		

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมันโดยใช้ถังดักไขมันร่วมกับถังเสริมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติระหว่างใบสนทะเล และ ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) ดังแสดงใน Table 2 จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง และใบสนทะเล พบว่า ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง มีลักษณะเป็นโพรงกระจายอยู่ทั่วไป ดังแสดงใน Figure 1 ส่วนใบสนทะเล มีลักษณะ พื้นผิวขรุขระเป็นรอยนูนตื้น ๆ ดังแสดงใน Figure 2 ใบสนทะเลมีรูปทรงแหลมเล็กคล้ายเข็ม ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก จากการศึกษาของ Dahri *et al.* (2015) พบว่า ใบสนทะเลมีพื้นที่ผิวประมาณ 351 ตร.ม./ก. ประกอบกับมีน้ำหนักเบาและมีรูปทรงที่ง่ายต่อการจัดวางในถังบำบัด ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน นอกจากนี้ยังเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งตามธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ ไม่เป็นพิษและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เมื่อวัสดุดูดซับถึงจุดอิ่มตัวหรือหมดอายุการใช้งานยังสามารถนำไปดัดแปลงเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ จึงเหมาะต่อการทำเป็นวัสดุดูดซับที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในการศึกษาครั้งต่อไป ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องจุดอิ่มตัวและอายุการ

ใช้งานของวัสดุดูดซับจากใบสนทะเลและถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาการบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยวัสดุดูดซับจากธรรมชาติต่อไป

Table 2 Comparison of oil and grease removal efficiency using natural sorbents

Experiment	% FOG removal	t	p -value
1.2 Grease trap with sorbent;			
Casuarina equisetifolia	67.76 ± 0.69	0.605	0.606
2.2 Grease trap with sorbent ;			
Coconut charcoal briquette	65.42 ± 6.70		

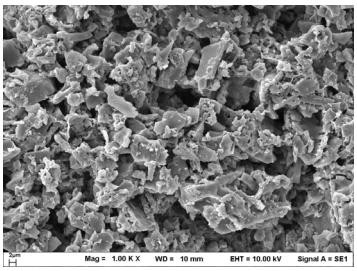


Figure 1 SEM of coconut charcoal briquettes.

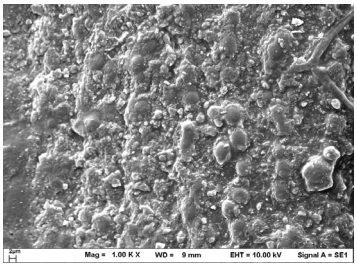


Figure 2 SEM of *Casuarina equisetifolia* needle.

สรุป

การบำบัดน้ำมันและไขมันด้วยถังดักไขมันที่มีระยะเวลากักพักน้อย หรือน้ำเสียมีน้ำมันอยู่ในรูปอิมัลชันซึ่งยากต่อการแยกตัวและลอยสู่ผิวน้ำ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของถังดักไขมันด้วยการเสริมถังวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ จากการศึกษาพบว่าวัสดุดูดซับจากธรรมชาติใบสนทะเล ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด 0.31 ± 6.75% และถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด 2.97 ± 14.21% ซึ่งวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันและไขมันไม่แตกต่างกัน โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันและไขมัน 67.76 ± 0.69% และ 65.42 ± 6.70% ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม และ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2548. **ราชกิจจนุเบกษา**. เล่มที่ 29 125ง วันที่ ตอนที่ 122 ธันวาคม 2548 เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด

บุญส่ง ไข่เกษ, สุธาสินี อั้งสูงเนิน, จิรา แก้วดำ และ ปัญจ์ปพัชรภร บุญพร้อม. .2554 ประสิทธิภาพของถังดักไขมันที่ ทำจากวัสดุเหลือใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือนและแผงลอยจำหน่ายอาหารในชุมชนซอยโซดาเขตดุสิต กรุงเทพมหานคร . **วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม** 7 (1);.42-30

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์. 2547 .**เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สนอง ทองปาน.2550 .ระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมในสถานศึกษา:แหล่งเรียนรู้ด้านสิ่งแวดล้อมศึกษาสำหรับโรงเรียนขยายโอกาส สังกัดกรุงเทพมหานคร .**วารสารวิชาการศึกษาศาสตร์** 8 (3): 44-55.

American Public Health Association (APHA). 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st ed., American Public Health Association, Washington DC.

Chu, W. and F. L. Ng. 2000. Upgrading the conventional grease trap using a tube settler. **Environment International** 26: 17-22.

Dahri, M. K., M. R. R. Kooh and L. B. L. Lim. 2015. Application of *Casuarina equisetifolia* needle for the removal of methylene blue and malachite green dyes from aqueous solution. **Alexandia Engineering Journal** 54: 1253-1263.

He, X., F. L. Reyes III, M. L. Leming, L. O. Dean, S. E. Lappi and J.J. Ducoste. 2013. Mechanisms of fat, oil and grease (FOG) deposit formation in sewer lines. **Water Research** 47: 4451-4459.

Luangrungkiat, P. 2002. KAP food establishment owners and factors affecting grease traps efficiency in Bangkok. **Thailand Journal of Health Promotion and Environmental Health** 25 (2): 54-64.

Mundo D. M. N. D. and M. Sutheerawattananonda. 2017. Influence of fat and oil type on the yield, physico-chemical properties and microstructure of fat, oil and grease (FOG) deposits. **Water Research** 124: 308-319.

Pintor, A. M. A., V. J. P. Vilar, C. M. S. Botelho and R. A. R. Boaventura. 2016. Oil and grease removal from wastewaters: Sorption treatment as an alternative to state-of-the-art technologies. A critical review. **Chemical Engineering Journal** 297: 229-255.

Srinivasan, A. and T. Viraraghavan. 2010. Oil removal from water using biomaterials. **Bioresource Technology** 101: 6594-6600.

Wahi, R., L. C. Abdullah, M. N. Mobarekeh, Z. Ngaini and T. C. S. Yaw. 2017. Utilization of esterified sago bark fiber waste for removal of oil from palm oil mill effluent. **Journal of Environmental Chemical Engineering** 5: 170-177.

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิพันธ์ แก้วสมพงษ์		ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรวิช วรรณไกรโรจน์	ประธานสาขาพืช	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี โสพรรณรัตน์	ประธานสาขาสัตว์	กรรมการ
สัตวแพทย์หญิง ดร.สิริรัตน์ นิยม	ประธานสาขาสัตวแพทยศาสตร์	กรรมการ
ดร.จีรภา หินซุย	ประธานสาขาประมง	กรรมการ
ดร.ศิริพร เรียบร้อย คิม	ประธานสาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.นวลวรรณ สุนทรภิษัช	ประธานสาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจียมไชยศรี	ประธานสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขนิษฐา วัชราภรณ์	ประธานสาขาอุตสาหกรรมเกษตร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แก้วจำปา	ประธานสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม	กรรมการ
ดร.พิกุล เอกวรางกูร	ประธานสาขาศึกษาศาสตร์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หฤทัย นำประเสริฐชัย	ประธานสาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันตรีหญิง ดร.พนมพร พุ่มจันทร์	ประธานสาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์	กรรมการ
ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์	ประธานฝ่ายสารสนเทศ	กรรมการ
ดร.นีรนุช ภาชนะทิพย์	ประธานฝ่ายสูจิบัตรและฝ่ายเลขานุการ	กรรมการ
นายปัญญา ซื่อตรง	ประธานฝ่ายจัดพิมพ์เอกสารทางวิชาการ	กรรมการ
นางมัลลิกา เกตุชรารัตน์		กรรมการและเลขานุการ
นางสาวยลรวิวรร วิบูรณวงศ์		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
นางสาวอรญา ศรีอนันต์		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
นางสาวทิพวรรณ เขม้นกิจ		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
นางสาวสุดธิดา มีสวัสดิ์		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1.	ผศ.ดร.ธิตินันท์ กาพย์เกิด	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
2.	ผศ.ดร.พจนารถ สุวรรณรุจิ	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
3.	ดร.จรรยา เจตนาเสน	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
4.	ดร.ไพบูลย์ เงินมีศรี	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
5.	ผศ.ดร.กรรณิการ์ ดวงมาลย์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
6.	ผศ.ดร.นันทนา สีสุข	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
7.	ผศ.ดร.สาวิตร ตระกูลน่าเลื่อมใส	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
8.	ผศ.ดร.อิงอร กิมกง	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
9.	ดร.ชุรภา ธีรภัทรสกุล	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
10.	รศ.ดร.เกียรติทวี ชูวงศ์โกมล	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
11.	ผศ.ดร.โชติกา หยกทองวัฒนา	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
12.	ผศ.ดร.ณัฐนันท์ ต.เทียนประเสริฐ	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
13.	ผศ.ดร.ศศิมนัส อุณจักร์	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
14.	ดร.ราตรี วงศ์ปัญญา	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
15.	ผศ.ดร.วันวิสา สุดประเสริฐ	ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์
16.	ดร.ฤทธี มีสัตย์	ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์
17.	ดร.เสรี พงศ์พันธุ์ภาณี	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
18.	รศ.ดร.นวลวรรณ สุนทรภิษัช	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์
19.	รศ.ดร.วรเศรษฐ สุวรรณิก	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์
20.	รศ.ดร.บุญเสฐียร บุญสูง	ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
21.	รศ.ดร.วัชริยา ภูรีวิโรจน์กุล	ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
22.	ผศ.ดร.วุฒิ ทักษิณธรรม	ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
23.	ดร.ปราโมทย์ ชำนาญปืน	ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

Editorial Board

Subject: Science and Genetic Engineering (internal)

1. Asst.Prof.Dr.Thitinun Karpkird
2. Asst.Prof.Dr.Potjanart Suwanruji
3. Dr.Junya Jettanasen
4. Dr.Paiboon Ngernmeesri
5. Asst.Prof.Dr.Kannika Duangmal
6. Asst.Prof.Dr.Nantana Srisuk
7. Asst.Prof.Dr.Savitr Trakulnaleamsai
8. Asst.Prof.Dr.Ingorn Kimkong
9. Dr.Churapa Teerapatsakul
10. Assoc.Prof.Dr.Kiattawee Choowongkomon
11. Asst.Prof.Dr.Chotika Yokthongwattana
12. Asst.Prof.Dr.Nattanan T.Thienprasert
13. Asst.Prof.Dr.Sasimanas Unajak
14. Dr.Ratree Wongpanya
15. Asst.Prof.Dr.Wanwisa Sudprasert
16. Dr.Ridthee Meesat
17. Dr.Saree Phongphanphanee
18. Assoc.Prof.Dr.Nuanwan Soonthornphisaj
19. Assoc.Prof.Dr.Worasait Suwannik
20. Assoc.Prof.Dr.Boonsatien Boonsoong
21. Assoc.Prof.Dr.Watchariya Purivirojkul
22. Asst.Prof.Dr.Wut Taksintum
23. Dr.Pramote Chumnanpuen

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1.	ศ.อรศิริ ปาณินทร์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
2.	ผศ.ดร.ชนิกานต์ ยิ้มประยูร	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
3.	ผศ.ดร.ณรงพน ไล่ประกอบทรัพย์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
4.	อ.ดร.อรชา กระแสอินทร์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
5.	รศ.ดร.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
6.	รศ.ดร.ชวเลข วณิชเวทิน	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
7.	รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
8.	ผศ.ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
9.	ผศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
10.	ผศ.ดร.วราเมศวร์ วิเชียรแสน	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
11.	ผศ.ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
12.	อ.ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
13.	อ.ดร.รังสรรค์ วงศ์จีรภัทร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
14.	อ.ดร.จักรพันธ์ เทือกต๊ะ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
15.	รศ.ดร.ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
16.	รศ.เกียรติไกร อายุวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
17.	ผศ.ดร.ประพจน์ ขุนทอง	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
18.	ผศ.ดร.ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
19.	ผศ.ดร.พงศ์ธร พรหมบุตร	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
20.	อ.ดร.เฉลิมพล เปล่งสะอาด	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
21.	อ.ดร.วีรชัย ชัยวรพฤกษ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
22.	อ.ดร.อรรถพร วิเศษสินธุ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
23.	รศ.ดร.เกียรติยุทธ กวีญาณ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
24.	รศ.ดร.มงคล รักษาพัชรวงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
25.	รศ.ดร.สมหญิง ไทยนิมิต	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
26.	ผศ.ดร.มิติ รุจานุรักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
27.	ผศ.ดร.สัญชัย เดชานุภาพฤทธา	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
28.	ผศ.ดร.ชูเกียรติ การะเกตุ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

29. ผศ.ดร.ดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
30. รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
31. ผศ.ดร.ชนินทร์ ปัญจพรผล ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
32. อ.ดร.ศุภพัชรี รอดเดชา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
33. อ.ดร.อนุสรณ์ สืบสาย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
34. รศ.ดร.อนันต์ มุ่งวัฒนา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
35. รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
36. ผศ.ดร.ชนะ รักษ์ศิริ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
37. ผศ.ดร.สุวิชภรณ์ วิชกูล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
38. อ.ดร.นราภรณ์ เภาประเสริฐ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
39. อ.ดร.พัชรี โตแก้ว ทองรัตนะ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
40. อ.ดร.วรวุฒิ หวังวัชรกุล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
41. รศ.ดร. วิไล เจียมไชยศรี ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
42. ผศ.ดร.วิลาสินี อยู่ชัชวาล ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
43. ผศ.ดร.มณฑล ฐานุตตมวงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
44. ผศ.ดร.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
45. ผศ.ดร.นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
46. อ.ดร.ศศิวิมล พุทธิรานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
47. รศ.ดร.ปองวิทย์ ศิริโพธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
48. รศ.ดร.เวชพงศ์ ชุติชูเดช ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
49. ศ.ดร.นุชนารถ ศรีวงศ์ตานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
50. อ.ดร.สมฤทัย ทะสดวก ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
51. ผศ.ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
52. อ.ดร.ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
53. ผศ.ดร.อมรฤทธิ์ พุทธิพิพัฒน์ขจร ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
54. ผศ.อมรเดช พุทธิพิพัฒน์ขจร ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
55. ผศ.ดร.สุภัทรชัย ชมพันธุ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา
56. อ.ดร.กิตติพงษ์ เยาวาจา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา
57. ผศ.ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
58. รศ.คณิตา ตังคณานุรักษ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม

59.	ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
60.	ดร.นุษรา สินบัวทอง	สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1.	รศ.ดร.ยิ่งสวัสดิ์ ไชยะกุล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2.	ศ.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
3.	รศ.ดร. ทรงยศ นาคอริยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
4.	ผศ.ดร.ชนาธิป สามารถ	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
5.	อ.ดร.ดารณี จารีมิตร	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
6.	รศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7.	รศ.ดร.สุธา ขาวเธียร	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8.	รศ.ดร.อัครวัชร เล่นวารี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9.	รศ.ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10.	ผศ.ดร.ทรรศนีย์ พฤกษาสิทธิ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11.	ผศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

12.	รศ.ดร.ชาคริต สุวรรณจำรัส	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
13.	ผศ.ดร.รุ่ง กิตติพิชัย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่อกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
14.	ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช	ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร
15.	รศ.ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
16.	ผศ.ดร.ปิติวัฒน์ วัฒนชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
17.	ผศ.ดร.มานพ แก้วโมราเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
18.	ดร.ทรงยศ กิจธรรมเกษร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
19.	อ.ดร.นพคุณ บุญกระพือ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
20.	ผศ.ดร.ปริญญา คงพรม	ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
21.	รศ.ดร.พัชรินทร์ วรธนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
22.	อ.ดร.เพชร์รัตน์ ลิ้มสุปรียารัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
23.	รศ.ดร.มณีรัตน์ องค์วรรณดี	สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
24.	รศ.ดร.สร้อยดาว วินิจนันทรัตน์	สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

25.	ผศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
26.	อ.ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข	ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

Editorial Board

Subject: Architecture and Engineering (internal)

1. Prof.Orsiri Panin
2. Asst.Prof.Dr.Chanikarn Yimprayoon
3. Asst.Prof.Dr.Narongpon Laiprakobsup
4. Dr.Aracha Krasae-in
5. Assoc.Prof.Dr.Prasert Suwanvitaya
6. Assoc.Prof.Dr.Chavalek Vanichvetin
7. Assoc.Prof.Dr.Apiniti Jotisankasa
8. Asst.Prof.Dr.Kitjapat Phuvoravan
9. Asst.Prof.Dr.Piyanut Wethavivorn
10. Asst.Prof.Dr.Varameth Vichiensan
11. Asst.Prof.Dr.Suphawut Malaikrisanachalee
12. Dr.Susit Chaiprakaikeow
13. Dr.Rangsan Wongjeeraphat
14. Dr.Chakrapan Tuakta
15. Assoc.Prof.Dr.Prakob Surawattanawan
16. Assoc.Prof.Kiatkrai Ayuwat
17. Asst.Prof.Dr.Prapot Kunthong
18. Asst.Prof.Dr.Tumrong Puttapitukporn
19. Asst.Prof.Dr.Pongtorn Prombut
20. Dr.Chalearmpol Plengsaard
21. Dr.Weerachai Chaiworapuek
22. Dr.Attaporn Wisessint
23. Assoc.Prof.Dr.Kiatiyuth Kveeyarn
24. Assoc.Prof.Dr.Mongkol Raksapatcharawong
25. Assoc.Prof.Dr.Somying Thainimit
26. Asst.Prof.Dr.Miti Ruchanurucks
27. Asst.Prof.Dr.Sanchai Dechanupaprittha
28. Asst.Prof.Dr.Chugiat Garagate
29. Asst.Prof.Dr.Dulpichet Rerkpreedapong
30. Assoc.Prof.Dr.Thumrongrut Mungcharoen
31. Asst.Prof.Dr.Chanin Panjapornpon
32. Dr.Supacharee Roddecha
33. Dr.Anusorn Seubsai
34. Assoc.Prof.Dr.Anan Mungwattana
35. Assoc.Prof.Dr.Prapaisri Sudasna Na Ayudthya
36. Asst.Prof.Dr.Chana Raksiri
37. Asst.Prof.Dr.Suwitchaporn Witchakul
38. Dr.Naraphorn Paoprasert
39. Dr.Phatcharee Toghaw Thongrattana
40. Dr.Worawut Wangwatcharakul
41. Assoc.Prof.Dr.Wilai Chiemchaisri
42. Asst.Prof.Dr.Wilasinee Yoochatchaval

43. Asst.Prof.Dr.Monthon Thanuttamavong
44. Asst.Prof.Dr.Duangrudee Chaysuwan
45. Asst.Prof.Dr.Nuchnapa Tangboriboon
46. Dr.Sasiwimon Buddhiranon
47. Assoc.Prof.Dr.Pongwit Siribodhi
48. Assoc.Prof.Dr.Vejapong Juttijudata
49. Prof.Dr.Nutchanart Sriwongsitanon
50. Dr.Somruthai Tasaduak
51. Asst.Prof.Dr.Siwalak Pathaveerat
52. Dr.Silisak Chertkiattipol
53. Asst.Prof.Dr.Amornrit Puttipipatkajorn
54. Asst.Prof.Amorndej Puttipipatkajorn
55. Asst.Prof.Dr.Suphattharachai Chomphan
56. Dr.Kittipong Yaovaja
57. Asst.Prof.Dr.Korntip Watcharapanyawong Techametheekul
58. Asst.Prof.Kanita Tungkananuruk
59. Asst.Prof.Dr.Chalor Jarusutthirak
60. Dr.Nusara Sinbuathong

Subject: Architecture and Engineering (external)

1. Assoc.Prof.Dr.Yingsawad Chaiyakul
2. Prof.Dr.Charowarit Chareeraktakoon.
3. Assoc.Prof.Dr.Songyot Nakariyakul
4. Asst.Prof.Dr.Chanatip Samart
5. Dr.Daranee Jareemit
6. Assoc.Prof.Dr.Chavalit Ratanatamskul
7. Assoc.Prof.Dr.Sutha Khaodhiar
8. Assoc.Prof.Dr.Akhrawat Lenwari
9. Assoc.Prof.Dr.Wiboonluk Pungrasmi
10. Asst.Prof.Dr.Tassanee Prueksasit
11. Asst.Prof.Dr.Pitcha Jongvivatsakul
12. Asst.Prof.Dr.Chakrit Suvanjumrat
13. Asst.Prof.Dr.Rung Kittipichai
14. Asst.Prof.Dr.Nuttapong Ruttanadech
15. Assoc.Prof.Dr.Suttichai Premrudeepreechacharn
16. Asst.Prof.Dr.Pitiwat Wattanachai
17. Asst.Prof.Dr.Manop Kaewmoracharoen
18. Dr.Songyot Kitthamkesorn
19. Dr.Noppakun Boonkrapue
20. Dr.Petcharat Limsupreeyarat
21. Asst.Prof.Dr.Parinya Khongprom
22. Assoc.Prof.Dr.Patcharin Worathanakul
23. Assoc.Prof.Dr.Maneerat Aongwandee
24. Assoc.Prof.Dr.Soydoa Vinitnantharat
25. Asst.Prof.Dr.Sanit Wongsa
26. Dr.Sorawit Powtongsook

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. ดร.ณัฐดนัย หาญการสุจริต ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
2. รศ.ดร.ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
3. ดร.ภัทรินทร์ ลีลาภิวัฒน์ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
4. รศ.ดร.ภาณุวัฒน์ สรรพกุล ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
5. ดร.ปิยะวณี จริยะสกุลโรจน์ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
6. รศ.ดร.รังรอง ยกส้าน ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
7. ผศ.ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
8. รศ.ดร.วาณี ชนเห็นชอบ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
9. ดร.ธนัท อ้วนอ่อน ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
10. ผศ.ดร.ประกิต สุขใย ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
11. ผศ.ดร.ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
12. รศ.ดร.มังกร โรจน์ประภากร ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
13. ดร.มัสลิน นาคไพจิตร ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
14. ดร.วรวัลย์ วอร์โร ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
15. รศ.ดร.วีระสิทธิ์ สรรพมงคลไชย ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
16. ผศ.ดร.สุทธิพันธุ์ แก้วสมพงษ์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
17. ดร.อุลัยวรรณ์ วิทยเกียรติ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
18. รศ.ดร.กมลวรรณ แจ้งชัด ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
19. ผศ.ดร.ทานตะวัน พิรักษ์ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
20. ผศ.ดร.เทพกัญญา หาญศีลวัต ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
21. รศ.ดร.นันทวัน เทิดไทย ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
22. ผศ.ดร.ปิติพร ฤทธิเรืองเดช ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
23. ผศ.ดร.พิสิฏฐ์ ธรรมวิถี ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
24. ผศ.ดร.วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
25. ผศ.ดร.วลัยรัตน์ จันทรปานนท์ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
26. ผศ.ดร.วิษฐิดา จันทราพรชัย ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
27. ดร.ศิวาพร โอเจริญ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
28. รศ.ดร.สุนทรี สุวรรณสิชณน์ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

29. รศ.ดร.เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
30. รศ.ดร.หทัยรัตน์ ริมคีรี	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
31. ผศ.ดร.จันทร์ทิพย์ เศรษฐยานนท์	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
32. ผศ.ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
33. ผศ.ดร.พรทิพย์ ธูปถมพงศ์	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
34. ผศ.ดร.อโนทัย ชลชาติภิญโญ	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
35. ดร.กนิฐพร วังใน	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
36. ผศ.ดร.กฤษกมล ณ จอม	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
37. รศ.ดร.โชคชัย ธีรกุลเกียรติ	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
38. รศ.ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
39. ดร.ปิติยา กมลพัฒนะ	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
40. ผศ.ดร.มาศอุบล ทองงาม	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
41. ดร.เยาวภา หล่อเจริญผล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
42. ผศ.ดร.สิริชัย ส่งเสริมพงษ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
43. ดร.สุดาทิพย์ แซ่ตั้น	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
44. ผศ.ดร.อุทัย กลิ่นเกษร	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
45. ดร.รังสิมา ชลคุป	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
46. ดร.อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
47. ผศ.ดร.ศิริพร เรียบร้อย คิม	ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร

48.	ผศ.ดร.พงษ์เทพ วิไลพันธ์	ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง
49.	ดร.ดาลัด ศิริวัน	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
50.	น.ส.ประจงเวท สาตมาลี	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
51.	ดร.วราภรณ์ ประเสริฐ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
52.	ดร.สุมิตรา บุญบำรุง	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
53.	น.ส.อภิญญา จุฑางกูร	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1.	รศ.ดร.กัลยา เลาหสงคราม	ข้าราชการบำนาญ
2.	รศ.ดร.เข็มชัย เหมะจันทร	ข้าราชการบำนาญ
3.	รศ.ดร.สุนีย์ นิธิสินประเสริฐ	ข้าราชการบำนาญ
4.	ศ.ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล	ข้าราชการบำนาญ
5.	รศ.ดร.วรรณา ตั้งเจริญชัย	ข้าราชการบำนาญ
6.	รศ.ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7.	ผศ.ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8.	ผศ.ดร.อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9.	รศ.ดร.สีหนาท ประสงค์สุข	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10.	ผศ.ดร.จิรวรรณ อภิรักษากร	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
11.	ผศ.ดร.วิชัย ลีลาวัชรมาศ	ศูนย์วิจัยการหมักเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
12.	ผศ.ดร.ยุทธนา พิมลศิริผล	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
13.	ดร.รัทรดา เทพประดิษฐ์	คณะเทคโนโลยีและการพัฒนาชุมชน มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

14. รศ.ดร.อมรรัตน์ มุขประเสริฐ	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
15. ผศ.ดร.รัชนี เจริญ	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี
16. ผศ.ดร.ศรีเวียง ทิพกานนท์	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี
17. ผศ.ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสิทธิ์	สาขาวิชาเทคโนโลยีเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ และออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
18. ผศ.ดร.สมโภช พจนพิมล	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
19. ดร.สุธีรา วัฒนกุล	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
20. ผศ.ดร.ปริตา ธนสุกาญจน์	ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
21. ผศ.ดร.ปวีนา น้อยทัพ	ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
22. ดร.จารุภัทร ลือชา	สาขาวิชาอุตสาหกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตกาญจนบุรี
23. ดร.ปิยาภรณ์ เชื่อมชัยตระกูล	สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
24. รศ.ดร.มนัส ชัยจันทร์	สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
25. ผศ.ดร.บุศรินทร์ เฆษะปะบุตร	ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
26. รศ.ดร.เถวียน วิทยา	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

27. รศ.ดร.วรัญญู ศรีเดช — ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

28. ผศ.ดร.มุทิตา มีนุ่น — ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

29. ผศ.ดร.พิชญอร ไหมสุทธิสกุล — คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

30. รศ.ดร.อดิศร เสวตวิวัฒน์ — คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

31. ดร.เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ — ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

32. ผศ.ดร.ดิสนีย์ สิงหวรเศรษฐ์ — นักวิชาการอิสระ

Editorial Board

Subject: Agro-Industry (internal)

1. Dr.Nathdanai Harnkarnsujarit
2. Assoc.Prof.Dr.Tunyarut Jinkarn
3. Dr.Pattarin Leelaphiwat
4. Assoc.Prof.Dr.Panuwat Suppakul
5. Dr.Piyawanee Jariyasakoolroj
6. Assoc.Prof.Dr.Rangrong Yoksan
7. Asst.Prof.Dr.Lerpong Jarupan
8. Assoc.Prof.Dr.Vanee Chonhenchob
9. Dr.Tanat Uan-On
10. Asst.Prof.Dr.Prakit Sukyai
11. Asst.Prof.Dr.Pramuk Parakulsuksatid
12. Assoc.Prof.Dr.Mangkorn Rodprapakorn
13. Dr.Massalin Nakphaichit
14. Dr.Worawan Wawro
15. Assoc.Prof.Dr.Werasit Sappamongkolchai
16. Asst.Prof.Dr.Suttipun Keawsompong
17. Dr.Ulaiwan Withayagiat
18. Assoc.Prof.Dr.Kamolwan Jangchud
19. Asst.Prof.Dr.Tantawan Pirak
20. Asst.Prof.Dr.Thepkunya Harnsilawat
21. Assoc.Prof.Dr.Nantawan Therdthai
22. Asst.Prof.Dr.Pitiporn Ritthiruangdej
23. Asst.Prof.Dr.Pisit Dhamvithee
24. Asst.Prof.Dr.Wannasawat Ratphitagsanti
25. Asst.Prof.Dr.Walairut Chantarapanont
26. Asst.Prof.Dr.Withida Chantrapornchai
27. Dr.Siwaporn O'Charoen
28. Assoc.Prof.Dr.Suntaree Suwonsichon
29. Assoc.Prof.Dr.Saowanee Lertworasirikul
30. Assoc.Prof.Dr.Hathairat Rimkeeree
31. Asst.Prof.Dr.Jantip Setthayanond
32. Asst.Prof.Dr.Kornthip Watcharapanyawong Techametheekul

33. Asst.Prof.Dr.Porntip Tooptompong
34. Asst.Prof.Dr.Anothai Cholachatpinyo
35. Dr.Kanithaporn Vangnai
36. Asst.Prof.Dr.Kriskamol Na Jom
37. Assoc.Prof.Dr.Chockchai Theerakulkait
38. Assoc.Prof.Dr.Namfone Lumdubwong
39. Dr.Pitiya Kamonpatana
40. Asst.Prof.Dr.Masubon Thongngam
41. Dr.Yaowapa Lorjaroenphon
42. Asst.Prof.Dr.Sirichai Songsermpong
43. Dr.Sudathip Sae-tan
44. Asst.Prof.Dr.Utai Klinkesorn
45. Dr.Rungsima Chollakup
46. Dr.Udomlak Sukatta
47. Asst.Prof.Dr.Siriporn Riebroy Kim
48. Asst.Prof.Dr.Pongtep Wilaipun
49. Dr.Dalad Siriwan
50. Miss Prajongwate Satmalee
51. Dr.Waraporn Prasert
52. Dr.Sumitra Boonbumrung
53. Miss Apinya Chudhangkura

Subject: Agro-Industry (external)

1. Assoc.Prof.Dr.Kalaya Laohasongkram
2. Assoc.Prof.Dr.Khemchai Hemachandra
3. Assoc.Prof.Dr.Sunee Nitisinprasert
4. Prof.Dr.Onanong Naivikul
5. Assoc.Prof.Dr.Wanna Tungjaroenchai
6. Assoc.Prof.Dr.Jirarat Anuntagool
7. Asst.Prof.Dr.Thanachan Mahawanich
8. Asst.Prof.Dr.Inthawoot Suppavorasatit
9. Assoc.Prof.Dr.Sehanat Prasongsuk
10. Asst.Prof.Dr.Jirawan Apiraksakorn
11. Asst.Prof.Dr.Vichai Leelavatcharamas
12. Asst.Prof.Dr.Yuthana Phimolsiripol
13. Dr.Rutrada Theppradit
14. Assoc.Prof.Dr.Amornrat Mukprasirt
15. Asst.Prof.Dr.Ratchanee Charoen
16. Asst.Prof.Dr.Sriwiang Tipkanon
17. Asst.Prof.Dr.Rattanaphol Mongkholrattanasit
18. Asst.Prof.Dr.Sompoche Pojjanapimol
19. Dr.Suteera Vatthanakul
20. Asst.Prof.Dr.Parita Thanasukarn
21. Asst.Prof.Dr.Paweena Noitup
22. Dr.Jarupat Luecha
23. Dr.Piyaporn Chueamchaitrakun
24. Assoc.Prof.Dr.Manat Chaijan
25. Asst.Prof.Dr.Bussarin Ksapabutr
26. Assoc.Prof.Dr.Thawien Wittaya
27. Assoc.Prof.Dr.Waranyou Sridach
28. Asst.Prof.Dr.Mutita Meenune
29. Asst.Prof.Dr.Pitchaon Maisuthisakul
30. Assoc.Prof.Dr.Adisorn Swetwiwathana
31. Dr.Kuakoon Piyachomkwan
32. Asst.Prof.Dr.Disney Singhawuarasate

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1.	ผศ.ดร.วราภรณ์ จันทรจำนงค์	ภาควิชากีฏวิทยา คณะเกษตร
2.	ผศ.ดร.ชามา พานแก้ว	ภาควิชากีฏวิทยา คณะเกษตร
3.	ผศ.ดร.พสุธา สุนทรห้าว	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
4.	ผศ.ดร.รัชนี โพธิแท่น	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
5.	ดร.สุรินทร์ อ้นพรหม	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
6.	ผศ.ดร.วัฒนชัย ตาเสน	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
7.	ผศ.ดร.สาพิศ ดิลกสัมพันธ์	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
8.	ดร.ออ พรานไชย	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
9.	นางมณฑาทิพย์ โสมมีชัย	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
10.	ผศ.ดร.แสงสรรค์ ภูมิสถาน	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
11.	ผศ.ดร.ชัชชัย ตันตสิรินทร์	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
12.	ผศ.ดร.นฤมล แก้วจำปา	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
13.	ผศ.ดร.สมนิมิตร พุกงาม	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
14.	ดร.ปิยพงษ์ ทองดีนอก	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
15.	ดร.ยุทธพงษ์ คีรีมังคละ	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
16.	ดร.วีนัส ต่วนเครือ	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
17.	รศ.ดร.วัลลภ อารีรบ	ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
18.	รศ.ดร.ผึ่งผาย พรรณวดี	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
19.	ผศ.ดร.นันทิยา หาญศุภลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
20.	รศ.ดร.ภัทรา เพ่งธรรมกีรติ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
21.	ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
22.	ผศ.ดร.ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
23.	ผศ.ดร.ภาสิณี วรชนะนันท์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
24.	ผศ.ดร.รัฐชา ชัยชนะ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
25.	ดร.ปิยาภรณ์ สมสมัคร	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
26.	ดร.สุธี จรรยาสุทธิวงศ์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
27.	ผศ.ดร.สุจิณณา กรรณสูต	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
28.	ผศ.ดร.อรอนงค์ ผิวนิล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม

29. ดร.กิตติชัย ดวงมาลย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
30. ดร.ทัศนีย์ บุญประคอง ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
31. ดร.ธนิศร์ ปัทมพิฑูร ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
32. ดร.นฤชิต ดำปิน ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
33. ดร.วัชรพงษ์ วาระรัมย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
34. ดร.สตรีไทย พุ่มไม้ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม : ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ศ.ดร.อภิชาต ภัทรธรรม สมาคมศิษย์เก่าวนศาสตร์
2. รศ.ดร.สิทธิชัย ตันธนะสฤษดิ์ สมาคมศิษย์เก่าวนศาสตร์
3. ดร.โกมล แพรกทอง สมาคมศิษย์เก่าวนศาสตร์
4. ดร.รณกร ตีรกานนท์ ศูนย์เพื่อคนกับป่า – รีคอฟ

Editorial Board

Subject: Natural Resources and Environment (internal)

1. Asst.Prof.Dr.Waraporn Juntarajumnong
2. Asst.Dr.Chama Phankaew
3. Asst.Prof.Dr.Pasutha Sunthornhao
4. Asst.Prof.Dr.Rachnee Pothitan
5. Dr.Surin Onprom
6. Asst.Prof.Dr.Wattanachai Tasen
7. Asst.Prof.Dr.Sapit Diloksumpun
8. Dr.Aor Pranchai
9. Miss Montathip Sommeechai
10. Asst.Prof.Dr.Sangsan Phumsathan
11. Asst.Prof.Dr.Chatchai Tantasirin
12. Asst.Prof.Dr.Naruemol Kaewjampa
13. Asst.Prof.Dr.Somnimirt Pukngam
14. Dr.Piyapong Tongdeenok
15. Dr.Yutthaphong Kheereemangkla
16. Dr.Venus Tuankrua
17. Assoc.Prof.Dr.Wallop Arirop
18. Assoc.Prof.Dr.Phungphai Phanawadee
19. Asst.Prof.Dr.Nanthiya Hansupalak
20. Assoc.Prof.Dr.PatthraPeng thamkeerati
21. Asst.Prof.Dr.Chalor Jarusutthirak
22. Asst.Prof.Dr.Prapaipid Chairattanamanokorn
23. Asst.Prof.Dr.Pasinee Worachananant
24. Asst.Prof.Dr.Ratcha Chaichana
25. Dr.Piyapawn Somsamak
26. Dr.Jutamas Romkaew
27. Asst.Prof.Dr.Sujinna Karnasuta
28. Asst.Prof.Dr.Onanong Phewnil
29. Dr.Kittichai Duangmal
30. Dr.Thassanee Boonprakong
31. Dr.Thanit Pattamapitoon
32. Dr.Narouchit Dampin
33. Dr.Watcharapong Wararam
34. Dr.Satreethai Poommai

Editorial Board

Subject: Natural Resources and Environment (external)

1. Prof.Dr.Apichart Pattaratuma
2. Assoc.Prof.Dr.Sittichai Tantanasrit
3. Dr.Komon Pragtong
4. Dr.Ronnakorn Triraganon

คณะกรรมการฝ่ายจัดพิมพ์เอกสาร

ดร.นีรนุช ภาชนะทิพย์
ที่ปรึกษา

นายปัญญา ซื่อตรง
ประธานกรรมการ

นายจรูญศักดิ์ สวนสวรรค์
รองประธานกรรมการ

นางมัลลิกา เกตุชรารัตน์
รองประธานกรรมการ

นางสาวปฐมาวดี กุลวัฒนะไพศาล
รองประธานกรรมการ

นางวัชรี ทองทิพย์
กรรมการ

นางสาวยลรวิวรรณ วิบูรณวงศ์
กรรมการ

นางสาวอุดมลักษณ์ พลอยสุวรรณ
กรรมการ

นางสาวสุดธิดา มีสวัสดิ์
กรรมการ

นางสาวจิราวรรณ สุริยกุล ณ อยุธยา
กรรมการ

นางสาวธิดา จันทาพูน
กรรมการ

นายภานุวัฒน์ บุญชัยกมลอากร
กรรมการ

นายวิทยา วงษ์เอี่ยม
กรรมการ

นางปนัดดา ดีหะริง
กรรมการ

นายวัชระ นิลประพันธ์
กรรมการ

นายภานุวัฒน์ บุญชัยกมลอากร
กรรมการ

นายวิทยา วงษ์เอี่ยม
กรรมการ

นางสาวกฤษฎี ปริวัตรกุล
กรรมการและเลขานุการ

นางนฤมล อินถา
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางสาวศลิษา หวานวาจา
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางสุณานี ศรีดี
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางสาวธัญญ์นัฐดา กุนอก
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ร่วมกับ

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

กระทรวงศึกษาธิการ

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ISBN : 978-616-278-434-7

ฝ่ายบริการการศึกษา สำนักทะเบียนและประมวลผล
อาคารระพีสาคริก ชั้น 7 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
โทร. 0 2942 8200 ต่อ 8211-8217 โทรสาร 0 2118 0145 E-mail : annualconference@ku.ac.th
http://www.annualconference.ku.ac.th